



UNIVERSITAT DE BARCELONA



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## TREBALL FI DE CARRERA

### Títol

**Estudio de la carga sólida de entrada en una red de alcantarillado  
urbana procedente de las cuencas de cabecera**

### Autor/a

**Daniel Hernández López**

### Tutor/a

**Manuel Gómez Valentín**

### Departament

**Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental**

### Intensificació

### Data

**27 Març 2009**

## RESUMEN

Con el objetivo de poder estimar la carga sólida de entrada en las redes de alcantarillado procedente de las cuencas de cabecera, se ha desarrollado un modelo de predicción de la erosión hídrica en dichas zonas. Debido a la irregular distribución temporal de las precipitaciones en el entorno geográfico mediterráneo, que es el área donde se ha llevado a cabo el estudio, se considera necesario realizar el cálculo erosivo a nivel de eventos de precipitación.

A partir de la solución de las ecuaciones de la aproximación de onda cinemática (cálculo hidráulico) mediante un esquema implícito de diferencias finitas, se aborda el cálculo erosivo que consiste en la aplicación de una ecuación de continuidad de la masa sólida juntamente con expresiones empíricas que determinan el desprendimiento y la capacidad de carga del flujo. La ecuación de continuidad también se resuelve con la aplicación del método de las diferencias finitas. Como paso previo a los cálculos hidráulicos y erosivos, se parametrizan todas las propiedades físicas de la cuenca de estudio. Para poder determinar las variaciones espaciales de dichas propiedades se ha considerado un modelo de características distribuidas.

El modelo propuesto se ha aplicado en dos cuencas de cabecera de la red de alcantarillado de la ciudad de Barcelona. Ambas cuencas se encuentran localizadas en la sierra de Collserola. Debido a la ausencia de datos reales para poder llevar a cabo una calibración, se ha decidido realizar una comparación de los resultados del modelo propuesto con otros modelos utilizados para determinar la erosión hídrica (MUSLE, USLE, ecuación de Fourier y ecuación Djorovic). Los resultados obtenidos se consideran satisfactorios ya que describen comportamiento lógicos de acuerdo con la naturaleza del fenómeno estudiado (erosión hídrica).

## ABSTRACT

A model for predicting water erosion in upland areas has been developed with the aim of estimating the entry of solid load into the urban sewer systems. Due to the irregular distribution of rainfall in Mediterranean area, which is the area where the study has been done, it is necessary perform the erosive calculation at the level of rainfall events.

The resolution of the erosive calculation has been done from the solution of the Kinematic Wave approximation (hydraulic calculation) by an implicit finite difference scheme. It consists in the application of continuity equation of solid mass with empirical expressions that determine detachment and transport capacity of flow. The continuity equation is solved with the method of finite difference too. As a preliminary step to the hydraulic and erosive calculations, all the physical properties of the watershed are parameterized. To determine the spatial variation of these properties a model of distributed characteristics has been considered.

The proposed model has been applied in two basins in headwaters of the sewer system of the city of Barcelona. Both basins are located in Collserola mountain range. Due to the absence of real data to carry out a calibration, the results of the proposed model have been compared with other models used to determine water erosion (MUSLE, USLE, Fourier equation and Djorovic equation). The results are satisfactory as they describe a logical behavior consistent with the nature of the studied phenomenon (water erosion).

# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2	CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS Y MODELOS	3
2.1	ESTIMACIONES EN PERIODOS ANUALES	3
2.1.1	ECUACIÓN DE ZING	3
2.1.2	ECUACIÓN DE MUSGRAVE	4
2.1.3	MODELO DE FOURNIER	4
2.1.4	MODELO DE DJOROVIC	4
2.1.5	ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (USLE)	6
2.1.6	ESTIMADOR DE PÉRDIDA DE SUELO SURAFRICANO (SLEMSA)	8
2.2	ESTIMACIONES A ESCALA DE EVENTOS	9
2.2.1	MODELOS EMPÍRICOS.	9
2.2.1.1	ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO MODIFICADA (MUSLE)	9
2.2.2	MODELOS DE BASE FÍSICA	10
2.2.2.1	PROCESOS FÍSICOS	10
2.2.2.2	EROSIÓN PERMANENTE	14
2.2.2.2.1	MODELO MEYER & WISCHMEIER	14
2.2.2.2.2	MODELO CREAMS	15
2.2.2.2.3	MODELO WEEP	17
2.2.2.3	EROSIÓN NO PERMANENTE	20
2.2.2.3.1	MODELO SHESED	20
2.2.2.3.2	ONDA CINEMÁTICA	21
3	JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO	25
3.1	PARAMETRIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO	26
3.2	CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN	27
3.3	TRANSFORMACIÓN LLUVIA - ESCORRENTÍA	28
3.4	CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	32
4	METODOLOGÍA DEL ESTUDIO	37
4.1	DESCRIPCIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO	37
4.2	MODELO HIDROLÓGICO	44
4.3	MODELO DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS	54
5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO HIDROLÓGICO	55
5.1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN	55
5.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA GEOMETRÍA DE LOS REGUEROS	58
5.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RED DE REGUEROS	62
6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETROS MODELO EROSIVO	65

6.1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE EROSIONABILIDAD $K$	65
6.2	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE CUBIERTA $C$	68
6.3	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RED DE REGUEROS	70
6.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	72
7	RESULTADOS	77
7.1	COMPARACIÓN DEL MODELO EROSIVO	77
7.1.1	PARÁMETROS Y VALORES OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA MUSLE	77
7.1.2	OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN	78
7.2	COMPARACIÓN DEL MODELO EROSIVO CON MÉTODOS DE EROSIÓN ANUAL	83
7.3	EROSIÓN LLUVIAS DE DISEÑO	85
8	CONCLUSIONES	93
	BIBLIOGRAFÍA	95
	ANEJOS	
1	LLUVIAS DE DISEÑO.	97
2	EPISODIOS DE LLUVIA NETA DE LA SERIE ANUAL	105
3	CÓDIGOS FUENTE PROGRAMACIÓN	117
4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA CUENCA MONTBAU	147
5	RESUMEN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	155

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores de los coeficientes $a$ y $b$ de la ecuación de Fournier.....	4
Tabla 2: Valores de los coeficientes de la ecuación de Djorovic.....	5
Tabla 3: Valores del coeficiente $C$ de la ecuación USLE según vegetación.....	7
Tabla 4: Valores del parámetro $C$ de cubierta vegetal de la USLE.....	41
Tabla 5: Valores de $C$ en la cuenca de estudio Masdeu.....	41
Tabla 6: Valores de $C$ en la cuenca de estudio Montbau.....	41
Tabla 7: Parámetros de erosionabilidad $K$ de la USLE en función de la clase textural del suelo.....	42
Tabla 8: Valor del número de curva en función del tipo de suelo y valor ponderado en la cuenca Masdeu.....	43
Tabla 9: Valor del número de curva en función del tipo de suelo y valor ponderado en la cuenca Montbau.....	43
Tabla 10: Valores de precipitación bruta extraídos de la curva IDF para T2, T5 y T10.....	44
Tabla 11: Errores relativos del balance de masa de agua en las dos cuencas.....	54
Tabla 12: Caudal punta, tiempo a la punta, tensión pico, caudal sólido punta, tiempo a la punta de sólido, sólido vertido, del desprendimiento y de la deposición en el interior de la cuenca en función del valor del coeficiente de fricción. Cuenca Masdeu. ...	55
Tabla 13: Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función del ancho del reguero en el punto de desagüe.....	58
Tabla 14: Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función del ángulo el talud del reguero en el punto de desagüe.....	60
Tabla 15: Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función de la red de regueros.....	62
Tabla 16: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición y sólido almacenado en el instante final en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro $K$ . Cuenca Masdeu.....	65
Tabla 17: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro $K$ para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.....	65
Tabla 18: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición, sólido almacenado en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función de $K$ . Cuenca Masdeu.....	66
Tabla 19: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro $K$ para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Masdeu.....	67
Tabla 20: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición, sólido almacenado en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función de $C$ . Cuenca Masdeu.....	68
Tabla 21: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro $C$ para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.....	68
Tabla 22: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro $C$ . Cuenca Masdeu.....	69
Tabla 23: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro $C$ para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Masdeu.....	69
Tabla 24: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función de la red de regueros. Cuenca Masdeu.....	70
Tabla 25: Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.....	70
Tabla 26: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función de la red de regueros. Cuenca Masdeu.....	71
Tabla 27: Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Masdeu.....	71
Tabla 28: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por impacto de lluvia.....	72
Tabla 29: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Masdeu.....	72
Tabla 30: Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por impacto de lluvia para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.....	73
Tabla 31: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por flujo. Cuenca Masdeu.....	73
Tabla 32: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Masdeu.....	73
Tabla 33: Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.....	73
Tabla 34: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad de la capacidad de transporte del flujo hidráulico. Cuenca Masdeu.....	74
Tabla 35: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Masdeu.....	74
Tabla 36: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Masdeu.....	75
Tabla 37: Parámetros MUSLE de las dos cuencas de estudio.....	77
Tabla 38: Caudal punta, precipitación y material vertido (toneladas) en cada lluvia de diseño.....	78
Tabla 39: Valores obtenidos de los parámetros de calibración para cada lluvia de diseño. Cuenca Masdeu.....	78

Tabla 40: Precipitación neta, intensidad media e intensidad máxima de precipitación neta para cada periodo de retorno. Cuenca Masdeu.....	79
Tabla 41: Valores obtenidos de los parámetros de calibración para cada lluvia de diseño. Cuenca Montbau. ....	81
Tabla 42: Precipitación neta, intensidad media e intensidad máxima de precipitación neta para cada periodo de retorno. Cuenca Montbau. ....	81
Tabla 43: Sólido vertido, volumen ocupado por éste, desprendimiento y deposición en ambas cuencas para cada evento de lluvia neta de la serie anual. ....	83
Tabla 44: Parámetros y resultados ecuación USLE. ....	84
Tabla 45: Resultados método de Fournier y ecuación de Djourovic.....	84
Tabla 46: Esquematización de resultados de la cuenca Montbau. (Caudal punta, tiempo al caudal punta, volumen de agua vertido por la cuenca, caudal sólido punta, tiempo al caudal sólido punta, cantidad de sólido vertido por la cuenca, concentración media y máxima del flujo en el punto de desagüe). ....	88
Tabla 47: Lluvias brutas de diseño, pérdidas acumuladas y lluvias netas de diseño de la cuenca Masdeu.....	100
Tabla 48: Lluvias brutas de diseño, pérdidas acumuladas y lluvias netas de diseño de la cuenca Montbau. ....	102
Tabla 49: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro K. Cuenca Montbau.....	147
Tabla 50: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro K para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	147
Tabla 51: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro K. Cuenca Montbau. ....	148
Tabla 52: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro K para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Montbau. ....	148
Tabla 53: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro C. Cuenca Montbau.....	149
Tabla 54: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro C para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	149
Tabla 55: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro C. Cuenca Montbau.....	150
Tabla 56: Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro C para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Montbau. ....	150
Tabla 57: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función de la red de regueros. Cuenca Montbau. ....	150
Tabla 58: Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	150
Tabla 59: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Montbau.....	151
Tabla 60: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Montbau. ....	152
Tabla 61: Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por impacto de lluvia para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	152
Tabla 62: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau. ....	152
Tabla 63: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau. ....	152
Tabla 64: Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	152
Tabla 65: Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau. ....	153
Tabla 66: Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau. ....	153
Tabla 67: Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau. ....	154

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Nomograma de erosionabilidad del suelo. ....	7
Gráfico 3: Diagrama de flujo propuesto por Meyer y Wischmeier. Obtenido de Regoyos (2003). ....	14
Gráfico 4: A) Discretización espacial de una cuenca con un posible sendero de flujo B) Direcciones de flujo consideradas y valor de la celda en la matriz de orientaciones según dirección C) Numeración de las celdas adyacentes para el cálculo de la pendiente de la celda 5. ....	27
Gráfico 5: Malla de diferencias finitas. ....	31
Gráfico 6: Esquema de la producción de sedimentos en un volumen de control. ....	32
Gráfico 7: Clases texturales según granulometría del suelo. ....	42
Gráfico 8: Precipitaciones medias mensuales para el periodo 1914 – 1997 en la ciudad de Barcelona ....	43
Gráfico 9: Lluvias netas sintéticas cuenca Masdeu. Precipitación neta (mm) vs. tiempo (min). ....	45
Gráfico 10: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=2 años. Cuenca Masdeu. ....	46
Gráfico 11: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=5 años. Cuenca Masdeu. ....	46
Gráfico 12: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=10 años. Cuenca Masdeu. ....	47
Gráfico 13: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=20 años. Cuenca Masdeu. ....	47
Gráfico 14: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=50 años. Cuenca Masdeu. ....	48
Gráfico 15: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=100 años. Cuenca Masdeu. ....	48
Gráfico 16: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=200 años. Cuenca Masdeu. ....	49
Gráfico 17: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=500 años. Cuenca Masdeu. ....	49
Gráfico 18: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=2 años. Cuenca Montbau. ....	50
Gráfico 19: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=5 años. Cuenca Montbau. ....	50
Gráfico 20: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=10 años. Cuenca Montbau. ....	51
Gráfico 21: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=20 años. Cuenca Montbau. ....	51
Gráfico 22: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=50 años. Cuenca Montbau. ....	52
Gráfico 23: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=100 años. Cuenca Montbau. ....	52
Gráfico 24: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=200 años. Cuenca Montbau. ....	53
Gráfico 25: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=500 años. Cuenca Montbau. ....	53
Gráfico 26: Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años. Cuenca Masdeu. ....	56
Gráfico 27: Sedigramas de salida cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años. Cuenca Masdeu. ....	57
Gráfico 28: Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años. ....	57
Gráfico 29: Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años. ....	59
Gráfico 30: Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años. ....	59
Gráfico 31: Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes ángulos de talud de regueros T2 años. ....	61
Gráfico 32: Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años. ....	61
Gráfico 33: Redes de regueros A, B y C (de izquierda a derecha). ....	62
Gráfico 34: Hidrogramas de salida de cuenca aplicando diferentes redes de regueros T2 años. ....	62
Gráfico 35: Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años. ....	66
Gráfico 36: Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=10 años. ....	67
Gráfico 37: Sedigramas para cada cubierta vegetal analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años. ....	69
Gráfico 38: Sedigramas para cada cubierta vegetal analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=10 años. ....	70
Gráfico 39: Sedigramas para cada red de regueros analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años. ....	71
Gráfico 40: Sedigramas para cada red de regueros analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=10 años. ....	72
Gráfico 41: Sedigramas de los diferentes casos analizados en el análisis de sensibilidad del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu. ....	74
Gráfico 42: Sedigramas de los diferentes casos analizados en el análisis de sensibilidad del parámetro de calibración de la capacidad de transporte para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu. ....	75
Gráfico 43: Valor del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Masdeu. ....	79
Gráfico 44: Valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Masdeu. ....	80
Gráfico 45: Valor del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Montbau. ....	82
Gráfico 46: Valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Montbau. ....	82
Gráfico 47: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Montbau para T2 años. ....	85
Gráfico 48: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Montbau para T5 años. ....	86
Gráfico 49: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Montbau para T10 años. ....	87
Gráfico 50: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T2 años. ....	89
Gráfico 51: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T5 años. ....	90
Gráfico 52: Hidrograma y sedigrma de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T10 años. ....	91
Gráfico 53: Esquemmatización de resultados de la cuenca Masdeu. (Caudal punta, tiempo al caudal punta, volumen de agua vertido por la cuenca, caudal sólido punta, tiempo al caudal sólido punta, cantidad de sólido vertido por la cuenca, concentración media y máxima del flujo en el punto de desagüe). ....	92
Gráfico 54: Curvas IDF extraídas de la información meteorológica recogida en el observatorio Fabra de Barcelona en el periodo 1927 – 1993 para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años de periodo de retorno. ....	97
Gráfico 55: Hietogrmas de lluvia neta de diseño en función del periodo de retorno. Cuenca Masdeu. ....	102
Gráfico 56: Hietogrmas de lluvia neta de diseño en función del periodo de retorno. Cuenca Montbau. ....	103
Gráfico 57: Episodio de lluvia neta 1 de la serie anual en la cuenca Masdeu. ....	105
Gráfico 58: Episodio de lluvia neta 2 de la serie anual en la cuenca Masdeu. ....	105
Gráfico 59: Episodio de lluvia neta 3 de la serie anual en la cuenca Masdeu. ....	106
Gráfico 60: Episodio de lluvia neta 4 de la serie anual en la cuenca Masdeu. ....	106

Gráfico 61: Episodio de lluvia neta 5 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	106
Gráfico 62: Episodio de lluvia neta 6 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	107
Gráfico 63: Episodio de lluvia neta 7 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	107
Gráfico 64: Episodio de lluvia neta 8 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	107
Gráfico 65: Episodio de lluvia neta 9 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	108
Gráfico 66: Episodio de lluvia neta 10 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	108
Gráfico 67: Episodio de lluvia neta 11 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	108
Gráfico 68: Episodio de lluvia neta 12 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	109
Gráfico 69: Episodio de lluvia neta 13 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	109
Gráfico 70: Episodio de lluvia neta 14 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	109
Gráfico 71: Episodio de lluvia neta 15 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	110
Gráfico 72: Episodio de lluvia neta 16 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	110
Gráfico 73: Episodio de lluvia neta 17 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	110
Gráfico 74: Episodio de lluvia neta 18 de la serie anual en la cuenca Masdeu.....	111
Gráfico 75: Episodio de lluvia neta 1 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	111
Gráfico 76: Episodio de lluvia neta 3 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	111
Gráfico 77: Episodio de lluvia neta 4 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	112
Gráfico 78: Episodio de lluvia neta 6 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	112
Gráfico 79: Episodio de lluvia neta 7 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	112
Gráfico 80: Episodio de lluvia neta 10 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	113
Gráfico 81: Episodio de lluvia neta 11 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	113
Gráfico 82: Episodio de lluvia neta 12 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	113
Gráfico 83: Episodio de lluvia neta 13 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	114
Gráfico 84: Episodio de lluvia neta 14 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	114
Gráfico 85: Episodio de lluvia neta 15 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	114
Gráfico 86: Episodio de lluvia neta 16 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	115
Gráfico 87: Episodio de lluvia neta 17 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	115
Gráfico 88: Episodio de lluvia neta 18 de la serie anual en la cuenca Montbau.....	115
Gráfico 89: Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años.....	148
Gráfico 90: Sedigramas para cada valor de cubierta vegetal analizado e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años.....	149
Gráfico 91: Sedigramas para cada red de regueros analizada para T=2 años. Cuenca Montbau.....	151
Gráfico 92: Sedigramas en el punto de desagüe para la lluvia de dos años de periodo de retorno y para cada valor del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau.....	153
Gráfico 93: Sedigramas en el punto de desagüe para la lluvia de dos años de periodo de retorno y para cada valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau.....	154



## 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La erosión del terreno es un fenómeno propio de la actividad física de la Tierra y que ha estado presente en todos los tiempos geológicos del planeta. Los principales y más directos causantes de este proceso son el agua (ya sea en forma líquida o sólida) y el viento. Desde la aparición de la vida animal y en especial de la especie humana hasta la actualidad se han venido produciendo desequilibrios en los factores que rigen la erosión del suelo, dando lugar a un tipo de erosión denominada antrópica.

Este tipo de erosión se desencadena principalmente por cambios en el uso del suelo y generalmente implica aceleración en el proceso de erosión; de ahí que la erosión antrópica sea conocida también como erosión acelerada. Según la FAO la degradación del suelo se define como un proceso que rebaja la capacidad actual y potencial de éste para producir bienes y servicios (producción de biomasa, suministro de alimentos y materias primas, filtro protector del medio ambiente contra la contaminación, soporte físico para el desarrollo de actividades antrópicas...) Foster et al. (1985).

La erosión hídrica contemplada desde la óptica de la actividad humana es un fenómeno que puede producir diversos problemas, tanto desde el punto de vista de la producción de sedimentos como desde el punto de vista de su posterior sedimentación. En terrenos agrícolas y zonas rurales, la pérdida de suelo reduce la productividad de los campos y puede llegar a producir desertificación. La sedimentación, por su parte, degrada la calidad de las aguas; ya que los sedimentos pueden llevar adsorbidos productos químicos contaminantes. Además la sedimentación puede colmatar canales de riego y presas, y reducir la capacidad de transporte de arroyos, ríos y redes de drenaje. Según Foster et al.(1995) los impactos producidos por la erosión fuera del lugar donde se produce, es decir los producidos por la sedimentación, son potencialmente mayores que los producidos en la zona de erosión.

El presente estudio se centra en el cálculo de la producción de sedimentos en las zonas de cabecera de pequeñas cuencas urbanas por acción de la erosión hídrica; ya que como se ha comentado uno de los problemas que puede causar la producción de sedimentos y su posterior sedimentación es la reducción de la capacidad hidráulica en las redes de drenaje urbanas. Este hecho puede hacer que sea necesario un mantenimiento periódico de dichas instalaciones para garantizar su correcto funcionamiento o incluso hacer que sea necesaria la construcción de estructuras que eviten la entrada de sólidos en la red de drenaje.

En el entorno del litoral mediterráneo, el régimen pluviométrico es muy irregular a lo largo del año y las precipitaciones pueden tener un comportamiento torrencial. Estas dos premisas hacen que la precipitación anual acumulada suela producirse en unos cuantos días (según datos del Observatorio Fabra en la sierra de Collserola, en el año 2003 el 30% de la precipitación anual bruta se produjo en tan solo 12 días). Por este motivo, si se quiere cuantificar la erosión producida por acción del agua en el mencionado entorno geográfico, no tiene sentido realizarlo para periodos de tiempo anuales; ya que la mayor parte de la producción de sedimentos, al igual que la precipitación, se produce en unos pocos días.

Tradicionalmente los métodos para estimar la producción de sedimentos por efecto de la erosión hídrica han calculado valores promedio para grandes periodos de tiempo (generalmente erosión media anual) mediante el uso de ecuaciones empíricas. En la actualidad existen métodos que calculan valores de producción de sedimento para un suceso determinado de lluvia. Estos métodos tratan de cuantificar matemáticamente los procesos existentes en el fenómeno de la erosión y son conocidos como métodos de base física (aunque generalmente necesiten de parámetros empíricos para su aplicación).

Debido al carácter torrencial del litoral mediterráneo el principal objetivo de este trabajo es realizar un modelo que pueda cuantificar la producción de sedimento por erosión hídrica para periodos de tiempo pequeños (diarios o para eventos de lluvia). Además, con el objetivo de modelizar de la manera más veraz el fenómeno de la producción de sedimentos, se trata de evaluar la distribución temporal del caudal sólido transportado por un flujo.

Este estudio se centra en la producción de sedimentos en cuencas pequeñas (inferiores a 100 ha) que son cabecera de zonas urbanas y que por lo tanto drenan hacia su sistema de colectores de aguas pluviales.

Aunque el fenómeno de la producción de sedimentos sea conceptualmente sencillo; su modelación matemática y su cuantificación son aspectos que presentan muchas complicaciones. Esto implica que los parámetros de los modelos existentes para su predicción presenten mucha incertidumbre y sus resultados no siempre se ajusten a la realidad. Por esta razón, otro objetivo de este estudio es ayudar a comprender la naturaleza de estos procesos y facilitar la aplicación de modelos con esta finalidad.

Para poder llevar a cabo estos objetivos en primer lugar se realizará una revisión de los métodos y modelos existentes para la estimación de la erosión hídrica. Una vez realizada la clasificación se escogerá una metodología que cumpla con todos los requisitos necesarios para poder obtener resultados satisfactorios que se ajusten a los objetivos planteados. Se elaborará y pondrá a punto el modelo de producción de sedimento a la salida de la cuenca, y se aplicará a un par de cuencas urbanas de cabecera.

## 2. CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS Y MODELOS

Los modelos y métodos que estiman la producción de sedimentos<sup>1</sup> se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios. En función de los datos que utiliza (entradas) y la forma de generar resultados (salidas) se pueden distinguir entre físicos (modelos a escala reducida en laboratorio), analógicos (uso de sistemas eléctricos o mecanismos análogos al que se quiere estudiar) y digitales (que mediante el uso de ordenadores procesan gran cantidad de datos).

Dentro de los modelos digitales se puede distinguir entre modelos de base física, estocásticos y empíricos. Los primeros describen los procesos que intervienen en el fenómeno mediante el uso de ecuaciones matemáticas. Los modelos estocásticos se basan en la generación de series sintéticas a partir de las características estadísticas de los datos reales existentes. Los modelos empíricos consisten en la identificación de relaciones estadísticas significativas entre las variables consideradas, cuando se dispone de una base de datos razonable (experimentación).

También se puede establecer una clasificación en función de cómo se estima la erosión; directa o indirectamente. Como métodos de evaluación directa se pueden citar las medidas en el terreno mediante el uso de clavos de erosión o ensayos de estimación de parámetros relacionados con los sedimentos (concentración, caudal sólido...). Los métodos de evaluación indirecta estiman la erosión mediante relaciones empíricas entre parámetros.

En este capítulo se presenta una clasificación de los principales modelos o métodos de estimación indirecta que determinan la producción de erosión hídrica en función del período de tiempo de cálculo. Se pueden distinguir principalmente dos tipos de modelo: unos que realizan estimaciones para escalas de tiempo anuales y otros que lo hacen para escala de eventos de lluvia.

### 2.1 ESTIMACIONES EN PERIODOS ANUALES

Los métodos o modelos que realizan estimaciones de producción de sedimentos para períodos de tiempo anuales calculan aproximaciones medias de la erosión o pérdida de suelo en una determinada área. Todos ellos tienen carácter empírico y evalúan la erosión de manera indirecta. Algunos se basan en medidas obtenidas en parcelas de experimentación, mientras que otros se deducen a partir de observaciones realizadas en el medio natural.

#### 2.1.1 ECUACIÓN DE ZING

Calcula la erosión mediante la expresión que se muestra a continuación, ecuación de Zing (1940). Se determinó mediante la experimentación en parcelas y en campos de cultivo.

$$A = C \cdot S^{1.4} \cdot L^{0.6} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde  $A$  es un promedio de la pérdida de suelo por unidad de área ( $\text{mm/m}^2$ );  $S$  es la pendiente de la parcela expresada en grados;  $L$  es la longitud de la proyección horizontal de la parcela (m) y  $C$  es una constante que combina los efectos de los aguaceros, suelos, cultivos y prácticas de ordenación.

---

<sup>1</sup> En este estudio no se consideran los métodos cualitativos para determinar la erosión hídrica.

### 2.1.2 ECUACIÓN DE MUSGRAVE

La ecuación de Musgrave (1947) al igual que la de Zing se ha determinado mediante el seguimiento de la erosión en parcelas experimentales y en campos de cultivo. Se formula mediante la siguiente expresión:

$$E = 0.00527 \cdot I \cdot R \cdot S^{1.35} \cdot L^{0.35} \cdot P_{30}^{1.75}$$

**Ecuación 2**

$E$  expresa la pérdida de suelo en mm/año;  $I$  es la erosionabilidad (susceptibilidad a ser erosionado) del suelo medida en una parcela del 10% de pendiente y 22 metros de longitud;  $R$  es un factor que tiene en cuenta los efectos de la cubierta vegetal;  $S$  es la pendiente expresada en porcentaje;  $L$  es la longitud de la ladera en metros y  $P_{30}$  es la precipitación máxima en 30 minutos.

### 2.1.3 MODELO DE FOURNIER

Este modelo, Fournier (1960), suele ser aplicado como una primera aproximación para estimar la degradación específica en cuencas superiores a 2000 Km<sup>2</sup>. Se basa en los datos de 96 cuencas fluviales con más de 10000 Km<sup>2</sup> de superficie distribuidas por todo el mundo. Establece una correlación lineal entre el valor de  $X$  (degradación específica de la cuenca expresada en t/km<sup>2</sup>.año) y el valor de  $Y$  (índice de agresividad climática). La información de este modelo ha sido extraída de Almorox et al. (1994).

$$X = a \cdot Y + b$$

**Ecuación 3**

Los valores de  $a$  y  $b$  se encuentran tabulados en función de las características orográficas de la cuenca (exactamente en función del coeficiente orográfico  $H.tg\alpha^2$ ) y del tipo de clima (húmedo, semi-árido y árido). El índice de agresividad climática  $Y$  se obtiene dividiendo el cuadrado de la precipitación del mes más húmedo del año (mm) entre la precipitación media anual (mm). En la siguiente tabla se muestran los diferentes valores de  $a$  y  $b$ :

Características	Valor $a$	Valor $b$
$8.1 < Y < 20$ $H.tg\alpha < 6$	6.14	-49.78
$Y > 20$ $H.tg\alpha < 6$	27.12	-475.4
$H.tg\alpha > 6$ Húmeda o árida	52.49	-513.21
$H.tg\alpha < 6$ Semiárida	91.78	-737.62

**Tabla 1:** Valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  de la ecuación de Fournier.

### 2.1.4 MODELO DE DJOROVIC

Este modelo, Djorovic (1974) calcula la cantidad de suelo erosionado en cuencas no muy extensas con acusadas características torrenciales. Como en el modelo anterior la información ha sido extraída de Almorox et al. (1994).

$$W = T \cdot P \cdot \pi \cdot \sqrt{Z^3} \cdot F$$

**Ecuación 4**

$W$  es la cantidad de suelo erosionada (m<sup>3</sup>/año);  $T$  es un factor que tiene en cuenta las condiciones climáticas y depende de la temperatura media anual de la cuenca (°C) ( $T = [(temperatura\_media/10) + 1]^{0.5}$ );  $P$  es la precipitación media anual (mm);  $F$  es la superficie de la cuenca (Km<sup>2</sup>) y  $Z$  es un coeficiente de erosión que tiene en cuenta el estado erosivo

<sup>2</sup>  $H$  es la altura media de la cuenca y  $tg\alpha$  es el coeficiente de masividad del relieve y se calcula dividiendo la altura media entre la superficie de la cuenca.

de la cuenca, la erosionabilidad del suelo, la cubierta vegetal y la pendiente de la cuenca; se calcula con la siguiente expresión:

$$Z = y \cdot X \cdot (\Theta + s^{0.5})$$

Ecuación 5

$y$  es un coeficiente adimensional de erosionabilidad del suelo;  $X$  es un coeficiente adimensional que cuantifica la vegetación;  $\Theta$  es un coeficiente adimensional que cuantifica el estado erosivo y  $s$  es la pendiente media de la cuenca (m/m). Los valores de los coeficientes adimensionales se pueden consultar en la siguiente tabla:

<b>y</b>	<b>Suelos</b>
2	suelos sueltos, arenas y gravas
1.6	loess y suelos salinos
1.2	rocas calizas desintegradas
1.1	flisch y areniscas
1	esquistos
0.9	calizas duras y pizarras
0.5	suelos con buena estructura
<b>X</b>	<b>Cubierta vegetal</b>
1	suelo desnudo
0.9	barbecho
0.7	viñedos
0.6	pastizales de montaña
0.5	bosques
0.4	praderas
<b>Θ</b>	<b>Estado erosivo</b>
1	100% con erosiones profundas
0.9	80% erosiones profundas y cárcavas
0.8	50% deslizamientos
0.6	100% erosión laminar, algunos regueros y cárcavas
0.5	50% erosión laminar
0.3	20% erosión laminar
0.2	sin signos de erosión

**Tabla 2:** Valores de los coeficientes de la ecuación de Djorovic.

### 2.1.5 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO (USLE)

Se trata de un modelo paramétrico y empírico creado por Wischmeier y Smith (1965,1978) mediante experimentación en más de 20 parcelas repartidas a lo largo de la geografía de los Estados Unidos. Se trata de uno de los métodos más aceptados en todo el mundo para calcular la producción de sedimentos. Los parámetros no tienen ninguna realidad física y se evalúan mediante experimentación, por lo que es un método muy sensible a los cambios ambientales y la bondad en la estimación de la producción de sedimentos depende del rigor del valor de los parámetros utilizados. La USLE se trata de un método de cálculo indirecto de la erosión y produce estimaciones de la erosión media en períodos anuales de tiempo.

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad \text{Ecuación 6}$$

$A$  es la pérdida media anual de suelo [ $M/L^2.T$ ].

$R$  es el factor de erosividad pluvial [ $L.F.L/L^2.T.T$ ]. Se define como el producto de la energía cinética de la lluvia por la intensidad máxima durante 30 minutos. Considera solo la erosión por salpicadura. Se calcula como el sumatorio de las  $R$  obtenidas de cada suceso.

$$R' = E_c \cdot I_{30} = \left( \sum_{i=1}^{i=m} (e_i) \cdot (I_i \cdot T_i) \right) \cdot I_{30} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$R = \left( \frac{1}{N} \right) \cdot \sum_{i=1}^N R'_i \quad \text{Ecuación 8}$$

$I_i$  (mm/h) y  $T_i$  (h) son la intensidad y la duración de cada intervalo de la lluvia. Siendo  $m$  el número total de intervalos de un suceso.

$e_i$  es la energía cinética parcial para cada intervalo calculada con la siguiente fórmula ( $e_i = 0.119 + 0.0873 \cdot \log I_i$ ) y expresada en (MJ(ha.mm))

$K$  es el factor de erosionabilidad del suelo [ $M.L^2.T/L^2.L.F.L$ ]. Representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado a igualdad de condiciones de los demás factores que controlan la pérdida de suelo: precipitación, uso del suelo... y se puede describir como la pérdida de suelo por unidad de  $R$  en una parcela estándar (5° de pendiente, 22,13 de longitud, en condiciones de suelo desnudo, labrado recientemente en dirección de la pendiente y sin prácticas de conservación). Se obtiene mediante mediciones en ensayos de campo. Para facilitar la obtención del valor del parámetro de erosionabilidad se puede utilizar el nomograma que se muestra en el Gráfico 1.

Estos dos parámetros son los dos únicos de la ecuación USLE que tienen dimensiones y por tanto éstos son los que definen las unidades del resultado. Si el factor de erosionabilidad  $K$  se expresa en t.ha.h/ha.MJ.mm y el erosividad de la lluvia  $R$  en MJ.mm/ha.h.año la pérdida media anual  $A$  tiene como unidades t/ha.año.

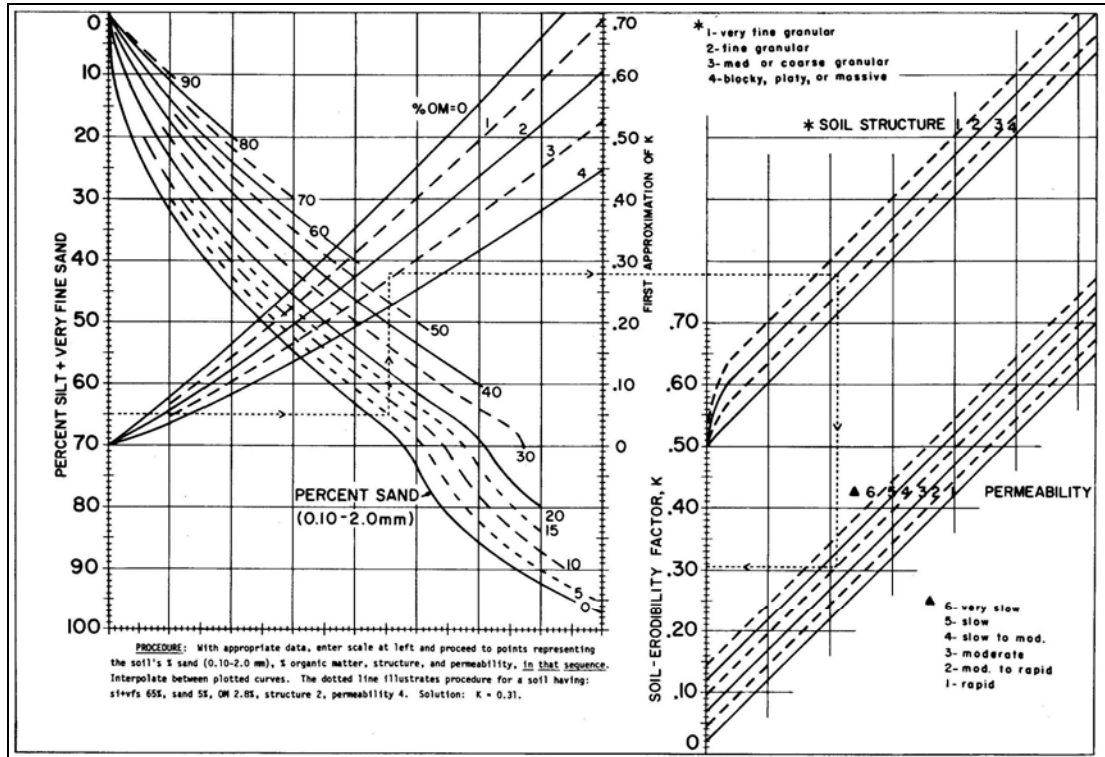


Gráfico 1: Nomograma de erosionabilidad del suelo.

$LS$  es el factor topográfico. Representa la tasa de pérdida de suelo por unidad de área de una parcela con determinada longitud y pendiente respecto a la pérdida en una parcela estándar; considerando iguales el resto de factores. Se determina mediante la siguiente expresión donde  $x$  es la longitud de la ladera en metros, el valor del exponente  $n$  se encuentra tabulado en función del valor de la pendiente  $s$  (expresada en porcentaje) y  $x$  es la longitud de la ladera expresada en metros.

$$LS = \left( \frac{x}{22.13} \right)^n \cdot (0.065 + 0.045s + 0.0065s^2)$$

Ecuación 9

$C$  es el factor de cubierta vegetal. Representa la relación entre la pérdida de suelo en una parcela con determinada vegetación y la pérdida en una parcela con barbecho continuo, a igualdad del resto de factores. El valor de este parámetro se encuentra tabulado en función de las características de la cubierta vegetal (cobertura superficial, cobertura aérea, tipo de vegetación...):

Terrenos naturales						
Tipo de vegetación	Porcentaje cobertura superficial					
	0	20	40	60	80	100
Pasto	1	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2
Hierbas altas o matorral bajo (0.5m)	17	12	13	8.3	4.1	1.1
Matorral o arbusto hasta 2 m	28	17	12	7.8	4	1.1
Árboles	36	20	13	8.4	4.1	1.1

Tabla 3: Valores del coeficiente  $C$  de la ecuación USLE según vegetación.

$P$  es el factor que tiene en cuenta las prácticas de conservación. Relaciona la pérdida de suelo en una parcela con unas determinadas prácticas de conservación y la pérdida de suelo en una parcela arada en la dirección de máxima pendiente. Si no existen prácticas de control de la erosión el valor es igual a la unidad.

Como limitaciones de la USLE se puede mencionar que no discrimina entre los diferentes tipos de erosión que se pueden producir (erosión por salpicadura, erosión por flujo). Además, al ser creado a partir de experimentación en parcelas, este método de cálculo no tiene en cuenta la deposición ni la posible aportación de sedimentos de aguas arriba que son fenómenos muy habituales en cuencas. Por estos motivos la USLE tiende a sobredimensionar el resultado de erosión y no es adecuado usarla para predecir la producción de sedimentos en cuencas; algunos autores proponen aplicar a los resultados de la USLE factores de corrección tales como  $0.5 \times A^{-0.12}$  donde  $A$  es el área de la cuenca expresada en  $\text{Km}^2$ . Como ya se ha dicho anteriormente, la USLE calcula erosiones medias para períodos anuales y obviamente no puede utilizarse para estimar la producción de sedimentos de un suceso aislado.

Si se quiere saber más sobre la ecuación USLE se puede consultar el manual *Agriculture Handbook: Prediction rainfall erosion losses - a guide to conservation planning*.

### 2.1.6 ESTIMADOR DE PÉRDIDA DE SUELO SURAFRICANO (SLEMSA)

Realizado por Elwell (1984) a partir de datos obtenidos en Zimbabwe con la intención de desarrollar medidas adecuadas para la conservación de suelos. Al igual que el método USLE se trata de un modelo paramétrico y empírico. La información de este modelo ha sido extraída de Almorox et al. (1994). La pérdida de suelo  $Z$  se estima mediante el siguiente producto:

$$Z = K \cdot C \cdot X \quad \text{Ecuación 10}$$

$Z$  es la pérdida anual de suelo expresada en (t/ha.año)

$K$  es la pérdida media anual de suelo (t/ha.año) en una parcela tipo de dimensiones 30 x 10 metros y 4.5% de pendiente, en un suelo de erosionabilidad conocida  $F$  y barbecho continuo y desnudo. Relaciona la erosividad de la lluvia con la pérdida de suelo. Depende de la clase de suelo, de su textura, de las prácticas de conservación llevadas a cabo y de la intensidad media de la lluvia.

$X$  es un factor adimensional que relaciona la longitud y la pendiente de una parcela dada con las condiciones de una parcela tipo (30 x 10 metros y 4.5% de pendiente). Es un factor muy similar al coeficiente  $LS$  de la ecuación USLE y se calcula con la siguiente fórmula; donde  $l$  es la longitud de la ladera expresada en metros y  $s$  es la pendiente expresada en porcentaje.

$$X = l^{0.5} \cdot \frac{0.76 + 0.53 \cdot s + 0.076 \cdot s^2}{25.65} \quad \text{Ecuación 11}$$

$C$  relaciona la pérdida de suelo entre el cultivo considerado y la pérdida de suelo en condiciones de barbecho desnudo ( $C'$ ). Corrige la pérdida de suelo en un suelo desnudo para incluir los efectos de la cubierta vegetal. Depende de la energía de la lluvia interceptada por la cubierta vegetal ( $i$ ) expresada en (mm/h). Se calcula con la siguiente fórmula, en ella aparece un factor que es función de la vegetación y de  $i$ .

$$C = f(i, \text{vegetación}) \cdot C' \quad \text{Ecuación 12}$$

La función  $f$  para cultivos, praderas naturales, pastos densos o campos cubiertos con follaje es  $f = e^{-0.06 \cdot i}$  y para el resto de tipologías de vegetación es  $f = (2.3 - 0.01 \cdot i) / 30$ .



## 2.2 ESTIMACIONES A ESCALA DE EVENTOS DE LLUVIA

Los modelos y métodos que se incluyen en este apartado tienen en común que han sido ideados para determinar la producción de sedimentos en un área determinada para períodos de tiempo diarios o inferiores. A excepción de un modelo (MUSLE) que se trata de una modificación del método USLE, se trata de modelos de base física.

### 2.2.1 MODELOS EMPÍRICOS.

#### 2.2.1.1 ECUACIÓN UNIVERSAL DE PÉRDIDA DE SUELO MODIFICADA (MUSLE)

Al igual que la USLE se trata de un modelo paramétrico y empírico. Su formulación es idéntica a la de la ecuación USLE con la salvedad que se modifica el factor R por diferentes expresiones que tienen en cuenta el efecto de la escorrentía producida por un determinado evento de precipitación.

$$R_{MUSLE} = a \cdot R_{USLE} + (1 - a) \cdot 0.4 \cdot Q \cdot q_p \quad \text{Ecuación 13}$$

$a$  es un coeficiente que varía entre 0 y 1; representa la importancia relativa del aguacero comparada con la energía de la escorrentía para arrancar el suelo.  $R_{USLE}$  es el factor de erosividad de la lluvia de la USLE.  $Q$  (mm) es el volumen de escorrentía generado por un evento.  $q_p$  (m<sup>3</sup>/s) es el caudal punta generado por un evento.

Williams (1975) define la siguiente expresión para sustituir el factor R de la USLE:

$$R_{MUSLE} = 11.78 \cdot (Q \cdot q_p)^{0.56} \quad \text{Ecuación 14}$$

Onstad y Foster (1975) consideran:

$$R_{MUSLE} = 0.5 \cdot R_{USLE} + 0.2 \cdot Q \cdot q_p^{1/3} \quad \text{Ecuación 15}$$

El resto de parámetros de la ecuación son los mismos que en la USLE. Esta ecuación no proporciona información sobre la distribución temporal de la producción de erosión durante el evento. No debe ser usada cuando la separación (detachment) controla la producción de sedimento según Foster et al., (1982).

El modelo informático SWAT (Soil and Water Assessment Tool) del ARS (Agriculture Research Service) utiliza la expresión desarrollada por Williams de la MUSLE para obtener los valores de pérdida de suelo. Para tener en cuenta el tamaño de la cuenca, multiplica el volumen de escorrentía y el caudal pico por el área en la expresión antes mencionada. El programa SWAT está diseñado para realizar estimaciones de la calidad del suelo (erosión, contaminación por nutrientes...) a largo plazo (períodos anuales de tiempo) utilizando un incremento de tiempo de un día. Aunque la MUSLE es una de las ecuaciones más empleadas para determinar la erosión hídrica en eventos, al ser una modificación de un método empírico para determinar tasas anuales de erosión, los valores calculados pueden no ser representativos de los valores reales de producción de sedimento de un evento.

La información mostrada en este apartado ha sido extraída de Almorox et al. (1994) y Neitsch et al (2005).

## 2.2.2 MODELOS DE BASE FÍSICA

Los modelos que se presentan en este subapartado se basan en la modelación matemática de los procesos físicos que intervienen en el fenómeno erosivo para determinar la producción de sedimentos. Los principales procesos que intervienen son el desprendimiento (o erosión), el transporte y la deposición. Los modelos físicos de erosión hídrica parten de la base que los procesos de desprendimiento, transporte y sedimentación están controlados directamente por las condiciones hidrológicas. Así, cualquier factor que condicione las condiciones hidrológicas condicionará también los aspectos erosivos y de transporte.

Antes de continuar con la clasificación y descripción de modelos es preciso describir cualitativamente los diferentes procesos actuantes en el fenómeno que se intenta cuantificar.

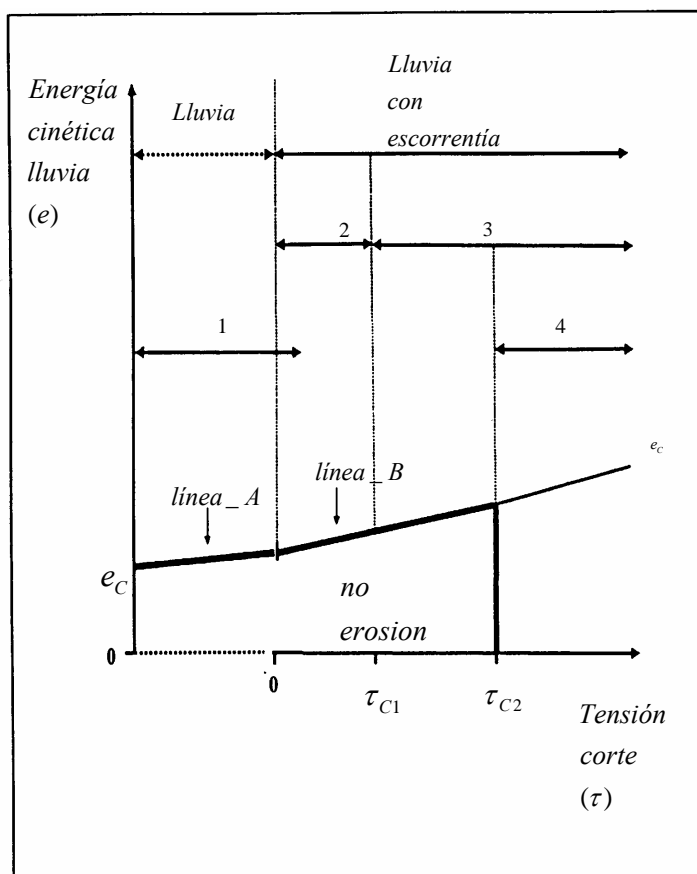
### 2.2.2.1 PROCESOS FÍSICOS

Los principales procesos que intervienen en el fenómeno de la aportación o producción de sedimentos en una cuenca son desprendimiento, transporte y sedimentación:

- *Desprendimiento es la disgregación o separación de las partículas del suelo por los agentes erosivos. Este hecho se produce cuando se rompen los enlaces interparticulares del suelo (cohesión en las arcillas, cementación de granos en materiales granulares...). Se pueden distinguir principalmente dos procesos erosivos realizados por el agua: desprendimiento por el impacto de las gotas de lluvia y desprendimiento por la acción de la escorrentía superficial o flujo.*
- *El transporte es el movimiento de los sedimentos de su ubicación original. Estos viajan desde las zonas altas a través de los arroyos e incluso pueden llegar a alcanzar el océano (Holeman, 1968).*
- *Sedimentación es la deposición de los sedimentos anteriormente desprendidos. No todos los sedimentos alcanzan el océano, algunos de ellos son depositados en las zonas de cambio de pendiente (abanicos), en presas y valles (ASCE 1975). Hay sedimentos que son depositados sólo temporalmente y las siguientes tormentas, algunas veces muchos años después, pueden volver a movilizarlos y transportarlos (Trimble, 1975). (Foster et al., 1982)*

El primer efecto que se produce en el suelo al iniciarse un evento de precipitación es la consolidación de éste por los impactos de las gotas de lluvia. A su vez el impacto de las gotas de lluvia, una vez que éstas han adquirido un valor umbral de energía cinética, produce sedimento (desprendimiento por impacto de las gotas). Si el evento de precipitación es lo suficientemente intenso, una vez se han superado las pérdidas de precipitación, empieza a producirse flujo superficial. Con la aparición del flujo superficial empieza a ejercerse tensión de corte sobre la superficie del terreno que es un agente causante también de desprendimiento (erosión por flujo).

A medida que el calado se hace mayor, la erosión por salpicadura decrece en su intensidad ya que las gotas de agua no golpean en la superficie del terreno o son amortiguadas por el flujo. En este instante el proceso erosivo que gana importancia es el desprendimiento por acción del propio flujo sobre el terreno. En el Gráfico 2 se puede observar el comportamiento cualitativo del fenómeno erosivo en función de las condiciones hidrológicas de un evento (representadas con las variables energía cinética del aguacero y tensión de corte del flujo sobre el terreno).



**Gráfico 2:** Comportamiento cualitativo de la producción de sedimentos ante un evento de lluvia. Gráfico obtenido en [www.soilerosion.net](http://www.soilerosion.net)

- 1: Erosión y transporte por salpicadura.
- 2: Erosión por salpicadura y transporte de flujo inducido por la lluvia.
- 3: Erosión por salpicadura y transporte de flujo.
- 4: Erosión y transporte por flujo.

$e_c$  Energía de caída crítica para producir erosión.

$\tau_{c1}$  Tensión crítica para transportar material suelto.

$\tau_{c2}$  Tensión crítica para producir erosión.

Línea A: Antes de la aparición de la escorrentía, incremento de  $e_c$  debido a la compactación del suelo.

Línea B: Con escorrentía, incremento de  $e_c$  para penetrar el flujo.

Tradicionalmente los modelos de base física han diferenciado dos zonas productoras de sedimento. Los regueros (en la literatura *rill*) (pequeños canales originados por la convergencia de la escorrentía debido a las irregularidades del terreno) y las zonas que quedan entre ellos (zona entre-regueros, *inter-rill*). Actualmente los modelos no suelen distinguir entre la erosión producida en los regueros y la producida entre ellos, simplemente diferencian entre los dos tipos de mecanismo de desprendimiento (por salpicadura y por flujo).

## DESPRENDIMIENTO POR SALPICADURA

El desprendimiento por salpicadura de las gotas está estrechamente ligado a la energía cinética de la lluvia, a la intensidad de precipitación, al tamaño de las gotas de lluvia, a las condiciones de cubierta, a las características del suelo y a la profundidad de flujo presente. En el momento de golpeo de una gota de lluvia sobre el terreno se pueden distinguir dos componentes en la fuerza que ésta aplica al suelo. Una normal a la superficie del terreno y otra tangencial. La primera componente produce compactación del suelo y la segunda produce desprendimiento. El fenómeno de la compactación reduce la porosidad del suelo y por lo general también reduce la infiltración y aumenta la cantidad de precipitación neta.

Estudios realizados sobre la energía cinética necesaria para desprender un kilogramo de sedimentos por impacto de las gotas de lluvia demuestran que la energía mínima se requiere para partículas de 0.125 milímetros; y que las partículas entre 0.063 y 0.250 milímetros son las más vulnerables al desprendimiento (Poesen, 1985). Las partículas más grandes son resistentes al desprendimiento por su peso, y las arcillosas son resistentes debido a que la energía de las gotas de lluvia tiene que romper la adherencia o los enlaces químicos que ligan los minerales de las partículas de las arcillas (Yariv, 1976).

La mayor parte de las relaciones ideadas para determinar el desprendimiento por acción del impacto de las gotas de la lluvia se pueden resumir en las siguientes expresiones, donde se muestra la proporcionalidad entre el proceso físico y las variables físicas que lo controlan:

$$D_i \propto I^\alpha \cdot S^\beta \quad D_i \propto E_c^\gamma \cdot e^{-\delta \cdot h} \cdot I^\varepsilon$$

Donde  $D_i$  (Kg/m<sup>2</sup>.s) es la tasa de desprendimiento de partículas por acción del impacto de las gotas de la lluvia;  $I$  es la intensidad de la lluvia (mm/h);  $S$  es la pendiente (expresada como m/m o como el seno del ángulo);  $E_c$  es la energía cinética de la lluvia (J/m<sup>2</sup>) y  $h$  es el espesor de la lámina de agua (m). Los valores de los exponentes varían dependiendo del estudio y de la expresión considerada.

Para la primera expresión Li (1979) considera que el exponente  $\alpha$  varía entre 1 y 2 y no tiene en cuenta en su expresión la pendiente ( $\beta = 0$ ). Meyer y Wischmeier (1968) y Nearing et al. (1987) dan un valor de 1 a  $\alpha$  y tampoco consideran la influencia de la pendiente. Foster (1982) considera que  $\alpha$  es igual a 2 y  $\beta$  igual a 0.79, mientras que Raveendra (2007) considera el mismo valor para el exponente de la pendiente, acepta como valores posibles para  $\alpha$  el rango comprendido entre 1 y 2, aunque recomienda el uso del valor 2. Parece que 2 es un buen valor para el exponente  $\alpha$ . Meyer considera la expresión  $\alpha = 2 - (0.01 \times \% \text{ arcilla})$  para ajustar el valor del coeficiente. Bubenzer et al. (1971) consideran que el exponente  $\beta$  de la pendiente puede variar desde 0.8 para suelos arenosos hasta 1.8 para suelos arcillosos. Debe decirse que el término  $S$  se refiere a la pendiente local del punto donde impacta la gota y no a la pendiente media de la ladera. Es por este motivo que en muchas formulaciones del desprendimiento por impacto se desprecie el efecto de la pendiente.

El modelo EUROSEM (Morgan et al.1998) aplica una formulación acorde con la segunda expresión mostrada arriba. Consideran que  $\gamma$  es igual a la unidad,  $\delta$  varía entre 0.9 y 3.1 en función del tipo de textura del suelo y  $\varepsilon$  es 0. Torri (1986,1987,1992) considera que en función del tipo de suelo  $\delta$  tiene el mismo rango de variación que el expresado en el modelo EUROSEM, que  $\gamma$  varía entre 0.2 y 0.3 y  $\varepsilon$  igual a 0.

## DESPRENDIMIENTO POR FLUJO

El desprendimiento de partículas sólidas por efecto del flujo está directamente controlado por las condiciones hidráulicas del flujo superficial. Básicamente se produce erosión por el flujo cuando las fuerzas que ejerce éste son mayores a las que mantienen la partícula unida al resto. Además de estar controlado por las condiciones hidráulicas, el desprendimiento por acción del flujo también depende de las condiciones de cubierta del suelo y de la erosionabilidad del mismo (característica intrínseca del tipo de suelo).

Las características hidráulicas de un flujo se determinan principalmente por dos parámetros; uno es el número de Froude y otro el número de Reynolds determinados con las siguientes expresiones:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot R_H}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$R = \frac{v \cdot R_H}{\nu} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde  $v$  es la velocidad del flujo,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $R_H$  es el radio hidráulico y  $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua. El número de Reynolds es un índice de turbulencia. Cuanto más grande es la turbulencia, mayor es el poder erosivo del flujo. Números de Reynolds menores a 500 significan flujo laminar y valores superiores a 2000 significan flujos totalmente turbulentos. El número de Froude es una relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. Números de Froude

inferiores a uno significan regímenes lentos o subcríticos y valores superiores a uno dan lugar a regímenes rápidos o supercríticos caracterizados con un mayor poder erosivo.

Son muchas las formulaciones que existen del desprendimiento por efecto del flujo. La mayoría de ellas se pueden agrupar en dos tipos diferentes en función de la variable escogida para cuantificar el proceso. Un primer grupo escogen como variables el caudal o el esfuerzo cortante y el segundo grupo de expresiones escogen la concentración de sedimentos o el caudal sólido para describir este tipo de erosión<sup>3</sup>. En resumen el primer grupo de fórmulas se pueden resumir en las siguientes expresiones:

$$D_f \propto S^\alpha \cdot Q^\beta \quad D_f \propto \tau^\delta$$

Donde  $D_f$  (Kg/m<sup>2</sup>.s) es la tasa de desprendimiento de partículas,  $S$  es la pendiente (m/m),  $Q$  es el caudal del flujo (m<sup>3</sup>/h) y  $\tau$  es la tensión tangencial o esfuerzo cortante (Pa). Meyer y Wischmeier (1968) consideran que los exponentes  $\alpha$  y  $\beta$  tienen un valor igual a 2/3. Quansah (1985) dedujo experimentalmente unos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  iguales a 1.5 y 1.44 para flujos sin lluvia y de 1.12 y 0.64 para flujo acompañado de lluvia. Foster et al. en el modelo CREAMS (1980) consideran unos valores  $\alpha$  y  $\beta$  iguales a 2 y 4/3 respectivamente.

Las expresiones formuladas a partir de la tensión tangencial implícitamente consideran el caudal y la pendiente (ya que la fórmula de la tensión tangencial media es el producto del peso específico del agua por la pendiente y por el radio hidráulico, este último a su vez depende del caudal, la pendiente y la rugosidad). El exponente  $\delta$  es considerado igual a 3/2 por Raveendra (2007).

Otras expresiones que tienen en cuenta la tensión tangencial se formulan comparando la tensión tangencial crítica (valor umbral para que se produzca erosión  $\tau_{c2}$  en el Gráfico 2 ) con la tensión aplicada con el flujo. Se pueden citar como modelos que formulan de esta manera el desprendimiento por flujo al modelo WEEP (Foster et al., 1995) o el modelo SHESED (Wicks and Bathurst 1986).

Las formulaciones que tienen en cuenta la concentración máxima de sedimento o el caudal sólido introducen el concepto de capacidad de transporte (carga máxima de sedimentos que puede acarrear un determinado flujo) y consideran que el desprendimiento por flujo es proporcional a la diferencia entre la capacidad de transporte y la carga de sedimentos presente en el flujo. Algunos modelos que utilizan expresiones de este tipo son KINEROS o EUROSEM.

## TRANSPORTE Y DEPOSICIÓN

El transporte de sedimentos puede realizarse de dos formas distintas: mediante el impacto de las gotas de lluvia o mediante la incorporación del sedimento al flujo. El primer mecanismo de transporte traslada las partículas disgregadas a una cierta distancia de su ubicación original, pero no las transporta a distancias considerables como sí lo hace el segundo mecanismo. Es por esta razón que los modelos de base física suelen despreciar el transporte por golpeo de las gotas de lluvia.

El tercer proceso principal, la sedimentación o deposición, suele ser resuelta en los modelos de base física mediante la aplicación del concepto de capacidad de transporte. Esta es la carga máxima de sedimentos que puede ser acarreada por unas determinadas condiciones hidráulicas. Si la carga de partículas presente en el flujo excede a la capacidad de transporte se produce deposición de material. Siempre y cuando la carga de sedimento sea inferior a la capacidad se producirá transporte del material erosionado.

---

<sup>3</sup> Las dos primeras variables tienen un carácter puramente hidráulico y las dos segundas se pueden considerar como variables hidrológicas.

### 2.2.2.2 EROSIÓN PERMANENTE

Se define como modelos de erosión permanente aquellos que calculan la erosión y la carga de sedimentos de manera constante a lo largo del tiempo de estudio. Los tres modelos que se presentan a continuación cumplen esta condición.

#### 2.2.2.2.1 MODELO MEYER & WISCHMEIER

Históricamente es el primer modelo de base física, Meyer y Wischmeier (1968). Este modelo utiliza cuatro ecuaciones para describir independientemente los procesos de desprendimiento de las partículas por la lluvia, el desprendimiento del suelo por la escorrentía, la capacidad de transporte de la lluvia y la capacidad de transporte de la escorrentía. Aplicando ordenadamente el modelo a diferentes segmentos consecutivos de una ladera, los sedimentos siguen un itinerario sobre la superficie del suelo y se evalúa el patrón de la erosión a lo largo de la ladera. La mayoría de modelos posteriores con base física se basan en él. Las cuatro ecuaciones del modelo y el diagrama de flujo utilizado se muestran a continuación:

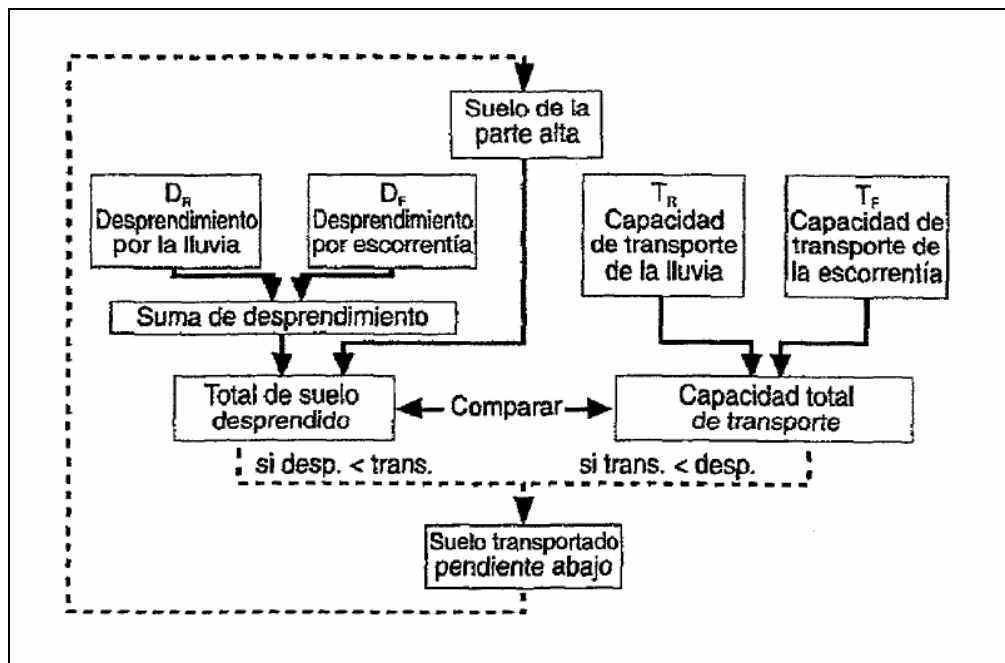


Gráfico 3: Diagrama de flujo propuesto por Meyer y Wischmeier. Obtenido de Regoyos (2003).

$$D_R = S_{DR} \cdot A \cdot I^2 \quad \text{Ecuación 18}$$

$D_R$  es el suelo disgregado por efecto de las gotas de la lluvia ( $\text{kg/m}^2$ );  $S_{DR}$  es un coeficiente definido por las características del suelo en cuanto a la susceptibilidad de ser disgregado por la gota de lluvia;  $A$  es la superficie de la parcela de estudio ( $\text{m}^2$ ) e  $I$  es la intensidad de la lluvia ( $\text{mm/h}$ ) media en el intervalo de tiempo considerado.

$$D_F = S_{DF} \cdot A \cdot \frac{Q_I^{2/3} \cdot S_I^{2/3} + Q_F^{2/3} \cdot S_F^{2/3}}{2} \quad \text{Ecuación 19}$$

$D_F$  es el suelo disgregado por acción de la escorrentía ( $\text{kg/m}^2$ );  $S_{DF}$  es un coeficiente definido por las características del suelo en cuanto a su susceptibilidad a ser disgregado

por la escorrentía;  $A$  es la superficie de la parcela ( $m^2$ );  $Q$  es el caudal ( $m^3/s$ ) y  $S$  es la pendiente ( $m/m$ ). Los subíndices  $I$  y  $F$  se refieren al las condiciones iniciales y finales.

$$T_R = S_{TR} \cdot S \cdot I \quad \text{Ecuación 20}$$

$T_R$  es la capacidad de transporte de sedimento por salpicadura de las gotas de lluvia;  $S_{TR}$  es un coeficiente por las características del suelo en cuanto a la facilidad para ser transportado por salpicadura;  $S$  es la pendiente del terreno ( $m/m$ ) e  $I$  es la intensidad de la lluvia ( $mm/h$ ).

$$T_F = S_{TF} \cdot Q^{2/3} \cdot S^{2/3} \quad \text{Ecuación 21}$$

$T_F$  es la capacidad de transporte de sedimento por escorrentía;  $S_{TF}$  es un coeficiente definido por las características del suelo en cuanto a su susceptibilidad a ser transportado por la escorrentía;  $Q$  es el caudal de transporte ( $m^3/s$ ) y  $S$  es la pendiente del curso de agua ( $m/m$ ).

#### 2.2.2.2.2 MODELO CREAMS

Es un modelo desarrollado en Estados Unidos para determinar la contaminación y para evaluar cuantitativamente los impactos ambientales de diferentes prácticas agrícolas (Foster et al.1982). Consta de tres módulos: hidrología, erosión y química. En este apartado se detallará el funcionamiento y las ecuaciones empleadas solamente en el módulo de erosión.

El módulo de erosión se basa en un método semiteórico que tiene en cuenta la erosión como la suma del desprendimiento producido por el flujo (el modelo asocia el desprendimiento por flujo a la erosión producida en los regueros) y el desprendimiento producido por el impacto de la lluvia (erosión entre regueros). Tiene cierta naturaleza empírica ya que utiliza los factores  $K$  y  $C$  de la USLE.

Supone que solo hay deposición en los regueros. Las ecuaciones usadas en el modelo CREAMS son permanentes en el tiempo. Para el cálculo de la erosión producida en una tormenta considera el caudal de pico como constante. Aunque se ha utilizado para estimar la erosión en cuencas pequeñas, es un modelo apto para grandes extensiones.

La ecuación de continuidad para estado permanente y la relación entre la erosión y el transporte son determinados por las siguientes expresiones:

$$\frac{dq_s}{dx_*} = D_r + D_i \quad \text{Ecuación 22}$$

$$\frac{D_r}{D_{c0}} + \frac{q_s}{T_{c0}} = g_* = \frac{T_c}{T_{c0}} = \frac{D_c}{D_{c0}} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde  $D_r$  es la tasa de desprendimiento en los regueros ( $kg/m^2.s$ ),  $D_i$  es la tasa de desprendimiento entre los regueros ( $kg/m^2.s$ ),  $D_c$  es la erosión potencial ( $kg/m^2.s$ ),  $T_c$  es la capacidad de transporte ( $kg/m.s$ ), y  $q_s$  es el caudal sólido ( $Kg/m.s$ ). El subíndice  $_0$  indica que el valor en cuestión se calcula para  $x=L_0$ ; donde  $L_0$  es la longitud de un tramo de

pendiente uniforme. El subíndice  $\cdot$  expresa que la variable  $x$  se adimensionaliza dividiendo  $x$  por  $L_0$ .

La solución de estas ecuaciones (Foster and Meyer, 1972a, 1975) se expresa en las siguientes igualdades:

$$\frac{q_s}{T_{c0}} = x_* - (1 - \theta) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot x_*}) \cdot \alpha^{-1} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\frac{D_r}{T_{c0}} = \frac{1}{L_0} \cdot (1 - \theta) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot x_*}) \quad \text{Ecuación 25}$$

$$\frac{D_r}{D_{c0}} = \frac{(1 - \theta) \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot x_*})}{\alpha} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{L_0 \cdot D_{c0}}{T_{c0}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$\theta = \frac{L_0 \cdot D_i}{T_{c0}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Las expresiones de la erosión por impacto de las gotas de la lluvia y por flujo son las siguientes:

$$D_i = 0,21 \cdot \left( \frac{EI_{30}}{100} \right) \cdot (S + 0,014) \cdot K \cdot C \cdot P \cdot \left( \frac{\sigma_p}{V_u} \right) \quad \text{Ecuación 29}$$

$$D_c = 37983 \cdot V_u \cdot \sigma_p^{1/3} \cdot \left( \frac{x}{72,6} \right)^{m-1} \cdot S^2 \cdot K \cdot C \cdot P \cdot \left( \frac{\sigma_p}{V_u} \right) \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde  $S$  es la pendiente expresada como el seno del ángulo,  $\sigma_p$  es el caudal de pico ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $V_u$  es el volumen de escorrentía (mm),  $P$  es el perímetro mojado (m) y se utiliza solamente para el cálculo en los contornos,  $K$  y  $C$  son los coeficientes de erosionabilidad del suelo y de la cubierta vegetal de la ecuación USLE (ver apartado 2.1.5).

La capacidad de transporte se determina con la ecuación de Yalin. Para determinar el valor de la capacidad de transporte se necesita saber primero el valor de la tensión de corte del terreno. Este valor es calculado en CREAMS con la siguiente expresión:

$$\tau = \gamma \cdot y \cdot S \cdot \left( \frac{n_{bs}}{n_{cov}} \right)^{0,9} \quad \text{Ecuación 31}$$



Donde  $\tau$  es la tensión de corte en el suelo (Pa),  $\gamma$  es el peso específico del agua ( $\text{N/m}^3$ ),  $S$  es el seno del ángulo de la pendiente,  $n_{bs}$  es el coeficiente de fricción de Manning para el suelo desnudo,  $n_{cov}$  es el coeficiente de fricción incluyendo la vegetación e  $y$  es la altura de flujo considerando el suelo desnudo (h).

### 2.2.2.2.3 MODELO WEEP

El modelo WEEP desarrollado por el departamento de agricultura de los Estados Unidos (USDA), incorpora una componente para el cálculo de la erosión hídrica en intervalos de tiempo variables (desde años hasta eventos). Como en los dos modelos anteriores, a partir de un cálculo hidrológico y basándose en una ecuación de continuidad de la masa de sedimento se realiza el cálculo de pérdida de suelo así como el de la tasa de sedimento del flujo.

Los parámetros hidráulicos necesarios para efectuar este cálculo son: caudal de pico, tiempo de duración de la escorrentía, intensidad efectiva de lluvia y duración de lluvia neta. El cálculo del proceso erosivo se efectúa en condiciones estacionarias en el tiempo considerando el caudal pico del evento como caudal de cálculo. El tiempo de escorrentía se calcula como la duración que tarda en escurrir el volumen total de la tormenta con una tasa de escorrentía igual al caudal pico.

El modelo WEEP calcula la erosión en perfiles de ladera unidimensionales considerando dos zonas diferenciadas de erosión: una zona de regueros en donde confluye el flujo (pequeños canales) y otra zona entre regueros donde el flujo es de lámina delgada.

Utiliza la misma ecuación de continuidad de sedimento permanente en el tiempo que el modelo CREAMS (Curtis, 1976; Foster and Huggins, 1977; Thomas, 1976):

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i \quad \text{Ecuación 32}$$

$G$  es la tasa de sedimentos transportada por el flujo ( $\text{Kg/s.m}$ ).  $D_f$  es la tasa de erosión en los regueros ( $\text{Kg/s.m}^2$ ).  $D_i$  es la tasa de erosión en la zona entre los regueros ( $\text{Kg/s.m}^2$ ).

La tasa de erosión en los regueros se calcula de la siguiente manera siempre y cuando la tensión ejercida por el flujo sea superior a la tensión crítica y la carga de sedimentos no exceda al valor de la capacidad de transporte:

$$D_f = k_r \cdot (\tau - \tau_c) \cdot \left(1 - \frac{G}{T_C}\right) \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde  $k_r$  es un factor de erosionabilidad del suelo ( $\text{s/m}$ ) que se calcula con la ecuación 35.  $G$  es la tasa de sedimentos transportada por el flujo ( $\text{Kg/s.m}$ ).  $T_C$  es la capacidad de transporte del flujo ( $\text{kg/s.m}$ ).  $\tau$  es la tensión tangencial sobre las partículas del suelo (Pa). El valor de la tensión crítica  $\tau_c$  (Pa) se obtiene de la siguiente expresión:

$$\tau_c = \tau_{cb} \cdot (C\tau_{rr}) \cdot (C\tau_{sc}) \cdot (C\tau_{cons}) \cdot (C\tau_{fi}) \quad \text{Ecuación 34}$$

$\tau_{cb}$  es el valor de base de la tensión crítica de corte (Pa). Su valor depende principalmente del tamaño de grano del suelo. Por defecto WEEP da un valor de 3,1 Pa. Los otros coeficientes tienen en cuenta la rugosidad del terreno, posibles efectos de acorazamiento en el suelo, efectos de consolidación del suelo y de hielo y deshielo.

$$k_r = k_{rb} \cdot (Ck_{rbr}) \cdot (Ck_{rdr}) \cdot (Ck_{rlr}) \cdot (Ck_{rsc}) \cdot (Ck_{rft}) \quad \text{Ecuación 35}$$

$k_{cb}$  es el valor base del factor de erosionabilidad (s/m). Su valor depende del tipo de suelo y su tamaño de grano. El resto de coeficientes tienen en cuenta, la posible presencia de restos de plantas enterrados, la presencia de raíces, presencia de costras o consolidación del suelo y el efecto de hielo y deshielo en el suelo.

$$D_i = k_i \cdot I_e \cdot \sigma_{ir} \cdot SDR_{RR} \cdot F_{nozzle} \cdot \left( \frac{R_s}{w} \right) \quad \text{Ecuación 36}$$

$k_i$  es un factor de erosionabilidad similar a  $k_r$  (Kg/s.m<sup>4</sup>).  $I_e$  es la precipitación efectiva (m/s),  $\sigma_{ir}$  es la escorrentía en la zona entre regueros (m/s),  $SDR_{RR}$  es un coeficiente que tiene en cuenta la rugosidad del terreno así como la distribución del tamaño de grano de las partículas,  $F_{nozzle}$  tiene en cuenta la irrigación por aspersor,  $R_s$  es la separación entre regueros (m) y  $w$  es el ancho del reguero (m).

Suponiendo que el caudal de pico varía linealmente con la distancia, la expresión de la tensión de corte está determinada por la siguiente expresión:

$$\tau = \gamma_w \cdot \left( \frac{f_t}{8 \cdot g} \right)^{1/3} \cdot (q_p \cdot x \cdot S)^{2/3} \quad \text{Ecuación 37}$$

Donde  $\gamma_w$  es el peso específico del agua (N/m<sup>3</sup>),  $f_t$  es el factor de fricción del suelo con vegetación,  $g$  es la aceleración de la gravedad (m/s<sup>2</sup>),  $q_p$  es el caudal pico (m/s),  $x$  es la distancia (m) y  $S$  es la pendiente media de la ladera (m/m).

Si la tensión no supera la tensión crítica entonces el desprendimiento es nulo. En el caso de que la tasa de sedimentos fuera mayor que la capacidad de transporte se produciría deposición de sedimento. El fenómeno de la deposición es calculado por el modelo WEEP según la siguiente expresión:

$$D_f = \frac{0,5 \cdot V}{q} \cdot (T_c - G) \quad \text{Ecuación 38}$$

$V$  es la velocidad de caída de las partículas (m/s) y  $q$  es el caudal unitario (m<sup>2</sup>/s).

La capacidad de transporte se calcula mediante la expresión:

$$T_c = k_t \cdot \tau^{3/2} \quad \text{Ecuación 39}$$

$k_t$  es un coeficiente de transporte (m<sup>0.5</sup>·s<sup>2</sup>/kg<sup>0.5</sup>) y  $\tau$  es la tensión tangencial (Pa).

El modelo WEEP realiza los cálculos adimensionalizando todas las variables o parámetros y volviendo a dimensionalizar los resultados. Las variables adimensionalizadas se marcan con el subíndice \*. De este modo la distancia adimensional  $x_*$  se calcula dividiendo la distancia  $x$  entre la longitud total de la ladera  $L$ . La pendiente en un punto se expresa como:

$$s_* = a \cdot x_* + b \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde  $a$  y  $b$  son dos coeficientes que se extraen del perfil de la ladera.

La tensión tangencial adimensional  $\tau_*$  se adimensionaliza mediante la tensión tangencial aplicada al final de un tramo de pendiente constante  $\tau_{fe}$ .

$$\tau_{fe} = \gamma_w \cdot R \cdot \sin(\alpha) \cdot \left( \frac{f_s}{f_t} \right) \quad \text{Ecuación 41}$$

$R$  es el radio hidráulico (m),  $\alpha$  es el ángulo de pendiente,  $f_s$  es el factor de fricción de Darcy-Weisbach para un suelo desnudo y  $f_t$  es el factor de fricción considerando cobertura del suelo y rugosidad.

Como se ha comentado, la tensión tangencial se supone una función lineal de la pendiente. De esta manera, teniendo en cuenta las ecuaciones 37 y 40 la tensión tangencial adimensional se puede escribir de la siguiente manera:

$$\tau_* = (a \cdot x_*^2 + b \cdot x_*)^{2/3} \quad \text{Ecuación 42}$$

Si a la ecuación 39 le introducimos la ecuación 42 se obtiene la expresión de la capacidad de transporte adimensional.

$$T_{c*} = k_t \cdot (a \cdot x_*^2 + b \cdot x_*)^{2/3} = \frac{T_c}{T_{ce}} \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde  $k_t$  es el coeficiente de transporte de la ecuación 39,  $T_c$  es la capacidad de transporte y  $T_{ce}$  es la capacidad de transporte al final de una pendiente uniforme (Kg/s.m).

La carga de sedimentos adimensional  $G_*$  se calcula dividiendo la carga de sedimentos  $G$  entre  $T_{ce}$ .

El modelo WEEP tiene 4 parámetros principales, dos para erosión en regueros (ecuaciones 44 y 45), uno para erosión en la zona entre regueros (ecuación 46) y otro para la deposición en los regueros (ecuación 47):

$$\eta = \frac{L \cdot k_r \cdot \tau_{fe}}{T_{ce}} \quad \text{Ecuación 44}$$

$$\tau_{cn} = \frac{\tau_c}{\tau_{fe}} \quad \text{Ecuación 45}$$

$$\theta = \frac{L \cdot D_i}{T_{ce}} \cdot \frac{t_e}{t_r} \quad \text{Ecuación 46}$$

$L$  es la longitud de la ladera (m),  $t_e$  es el tiempo de duración efectiva de la lluvia (s),  $t_r$  es el tiempo de duración de la escorrenría (s) y  $D_i$  es la tasa de erosión por impacto de lluvia en la zona entre regueros.

$$\phi = \frac{\beta \cdot V_f}{P_r} \quad \text{Ecuación 47}$$

La ecuación de continuidad de continuidad de sedimento (ecuación 32) una vez se han adimensionalizado las variables, queda de la siguiente forma:

$$\frac{dG_*}{dx_*} = \eta \cdot (\tau_* - \tau_{cn}) \cdot \left( 1 - \frac{G_*}{T_{c*}} \right) + \theta \quad \text{Ecuación 48}$$

$$\frac{dG_*}{dx_*} = \left( \frac{\phi}{x_*} \right) \cdot (T_{ce} - G_*) + \theta \quad \text{Ecuación 49}$$

La ecuación 48 se emplea en el caso que la carga de sedimentos sea inferior a la capacidad de transporte y por tanto se produzca erosión en el suelo. Por el contrario cuando la carga de sedimentos es superior a la capacidad de transporte se tiene deposición de sedimentos y la ecuación que rige el proceso físico es la 49. Como se puede comprobar, el parámetro  $\theta$  aparece en ambas ecuaciones, esto es debido a que en la zona entre regueros siempre se produce erosión y no deposición de material, produciéndose este fenómeno solamente en los regueros cuando la capacidad de transporte es superior a la máxima (capacidad de transporte).

La dimensionalización de la carga de sedimentos por unidad de ancho de los regueros se obtiene mediante la expresión:

$$G = G_* \cdot T_{ce} \cdot \left( \frac{w}{R_s} \right) \quad \text{Ecuación 50}$$

Para saber más del modelo WEEP consultar Foster et al. (1995).

### 2.2.2.3 EROSIÓN NO PERMANENTE

Los modelos que se presentan a continuación consideran la erosión y la carga de sedimentos variables en el tiempo. Utilizan una ecuación de continuidad de sedimentos más compleja que los modelos que determinan la erosión de manera permanente en el tiempo ya que tienen en cuenta la capacidad de almacenamiento de sedimento en el flujo.

#### 2.2.2.3.1 MODELO SHESED

SHESED es el módulo de cálculo de la erosión hídrica del SHE (Sistema Hidrológico Europeo) creado por Wicks y Bathurst en 1986. Es un modelo de base física. Una vez conocidas las variables hidráulicas necesarias para todo el dominio de estudio: caudales, velocidades, calados, tensiones de fondo; calcula la carga de sedimentos con la siguiente ecuación de continuidad de masa de sedimento que considera dos direcciones en el espacio:

$$\frac{\partial(h \cdot c)}{\partial t} + (1 - \lambda) \cdot \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial g_x}{\partial x} + \frac{\partial g_y}{\partial y} = D_F + D_R \quad \text{Ecuación 51}$$

$h$  es la profundidad de flujo [L],  $c$  es la concentración de sedimentos [M/L<sup>3</sup>],  $\lambda$  es la porosidad de la superficie del suelo [M/L<sup>3</sup>],  $z$  es la profundidad de suelo erosionado,  $g_x$  es la carga de sedimentos en la dirección  $x$  y  $g_y$  es la carga de sedimentos en la dirección  $y$  [M/T.L]. La solución de esta ecuación se obtiene mediante el empleo de métodos numéricos. Los términos  $D_F$  y  $D_R$  [M/L<sup>2</sup>.T] corresponden al desprendimiento por flujo y por impacto de las gotas de lluvia (se mantiene la notación de los autores). El modelo SHESED los determina con las siguientes expresiones:

$$D_R = k_r \cdot F_w \cdot (1 - C_G) \cdot [(1 - C_C) \cdot M_R + M_D] \quad \text{Ecuación 52}$$

$k_r$  es un coeficiente de erosividad de las gotas de agua,  $C_G$  es la proporción de suelo cubierto por cubierta herbácea.  $C_C$  es la proporción de suelo cubierto por vegetación arbustiva y/o arbórea.  $M_R = \alpha \cdot I^\beta$  donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes empíricos y tabulados en función del valor de la intensidad de lluvia  $I$ .  $M_D$  es un parámetro que considera la energía del agua que cae después de ser interceptada por la vegetación.  $F_W$  es un factor que tiene en cuenta la pérdida de erosividad de la lluvia con el incremento de calado ( $h$ ). Su valor se obtiene con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \text{si } h > D_m \quad F_W &= e^{(1-h/D_m)} \\ \text{si } h \leq D_m \quad F_W &= 1 \\ D_m &= 0,00124 \cdot I^{0,182} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$\begin{aligned} \text{para } \tau > \tau_C \quad D_F &= k_f \cdot \left( \frac{\tau}{\tau_C} - 1 \right) \\ \text{para } \tau \leq \tau_C \quad D_F &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 54}$$

$I$  es la intensidad de precipitación (mm/h),  $k_f$  es un coeficiente de erosividad por flujo,  $\tau_C$  es la tensión crítica de Shields (Pa) para el inicio del movimiento extendida (Mantz, 1977) y  $\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot S$  es la tensión de corte ejercida por el flujo.

### 2.2.2.3.2 ONDA CINEMÁTICA

Los modelos que se describen en este apartado son de base física, es decir, consideran los procesos que actúan en el fenómeno erosivo, y realizan el cálculo de la erosión a partir de la transformación de la lluvia en escorrentía. Todos ellos abordan la erosión mediante la misma ecuación de continuidad de sedimentos. Consideran la variación temporal y espacial de la escorrentía y de la tasa de sedimentos, así como el desprendimiento de estos. Generalmente se aplican para la estimación de la erosión hídrica en cuencas pequeñas.

El cálculo hidrológico (transformación lluvia-escorrentía) se realiza mediante la aproximación de las ecuaciones de Saint Venant por el método de la onda cinemática. En este método se desprecia el flujo convectivo y los términos de presión. Así las ecuaciones de gobierno del cálculo hidrológico son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \cdot m \cdot h^{m-1} \cdot \frac{\partial h}{\partial x} = r - f \quad \text{Ecuación 55}$$

$$q = \alpha \cdot h^m \quad \text{Ecuación 56}$$

$h$  es la altura de lámina de agua,  $\alpha$  y  $m$  son los parámetros de onda cinemática ( $\alpha = S^{0,5}/N$  y  $m = 5/3$  donde  $S$  es la pendiente y  $N$  un parámetro de fricción)  $r$  es la intensidad de precipitación y  $f$  son las pérdidas de la misma,  $q$  es el caudal unitario de escorrentía.

La solución analítica de las ecuaciones 55 y 56 no existe, así se hace necesario la utilización de métodos numéricos para poder resolverla. Generalmente se recurre al método de las diferencias finitas.

Todos los modelos o formulaciones mostradas en este apartado emplean la ecuación de continuidad de sedimentos que se muestra a continuación ( Foster and Meyer 1972; Bennet 1974). Es variable en el espacio y en el tiempo:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \rho_s \cdot \frac{\partial (C_C \cdot h)}{\partial t} = D_I + D_F \quad \text{Ecuación 57}$$

$q_s$  es la carga de sedimentos [M/L.T],  $\rho_s$  es la densidad de las partículas sólidas [M/L<sup>3</sup>],  $C_C$  es la concentración media de sedimento en el flujo [L<sup>3</sup>/L<sup>3</sup>],  $h$  es la altura de flujo [L],  $D_I$  es la tasa de desprendimiento de sedimento en la zona entre regueros [M/L<sup>2</sup>.T] y  $D_F$  es la tasa de desprendimiento de sedimento en los regueros [M/L<sup>2</sup>.T].

Teniendo en cuenta que  $q_s = \rho_s \cdot C_C \cdot q$  y que  $q = v \cdot h$  la expresión anterior se puede reescribir:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial (q_s / v)}{\partial t} = D_I + D_F \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde  $v$  es la velocidad del flujo [L/T].

Las diferencias fundamentales en los modelos que se exponen a continuación radican en las formulaciones tanto de los desprendimientos como de la capacidad de transporte del flujo

- Según Raveendra et al. (2007) ; el valor del  $D_I$  se obtiene de la siguiente expresión:

$$\text{si } z_w < z_M \quad D_I = \xi_I \cdot K \cdot C \cdot r^b \cdot (1 - z_w / z_M) \cdot (2.96 \cdot S^{0.79} + 0.56) \quad \text{Ecuación 59}$$

$$\text{si } z_w \geq z_M \quad D_I = 0$$

$D_I$  es el desprendimiento por impacto de la lluvia [M/L<sup>2</sup>.T];  $\xi_I$  es una constante de desprendimiento debido a la lluvia. Se trata de un parámetro de calibración;  $K$  es el factor de erosionabilidad de la USLE y  $C$  es el factor de cubierta vegetal de la USLE explicados en el apartado 2.1.5;  $r$  es la intensidad de precipitación [L/T];  $S$  es la pendiente [L/L];  $z_M$  es la máxima penetración de una gota en un flujo ( $z_M = 3 \cdot (2.23 \cdot r^{0.182})$ ) [L];  $z_w$  es la profundidad del flujo [L]. El exponente  $b$  varía entre 1 y 2. Según Meyer (1971) es igual a 2.

La expresión de la tasa de desprendimiento adopta la siguiente expresión:

$$D_F = \xi_F \cdot C \cdot K \cdot \tau^{1.5} \quad \text{Ecuación 60}$$

$$\tau = \gamma_w \cdot h \cdot S \quad \text{Ecuación 61}$$

$D_F$  es el desprendimiento por flujo [M/L<sup>2</sup>.T];  $\xi_F$  es un coeficiente de desprendimiento por flujo y es un parámetro de calibración.

Uno de los parámetros que controla la erosión es la capacidad de transporte del flujo. Cuando la suma de los sedimentos que vienen de aguas arriba más los erosionados en un punto determinado excede dicha capacidad se produce deposición de sedimentos. Según la metodología propuesta por Raveendra para la capacidad de transporte se hace uso de la expresión propuesta por Beasley (1980):

$$\text{para } q \leq 0.046 \text{ m}^3/\text{min} \quad T_F = \xi_{tc} \cdot C \cdot S \cdot q^{0.5} \quad \text{Ecuación 62}$$

$$\text{para } q > 0.046 \text{ m}^3/\text{min} \quad T_F = 101.4 \cdot \xi_{tc} \cdot C \cdot S \cdot q^2$$

Donde  $\xi_{tc}$  es un parámetro de calibración.

- Morgan et al. (1998) en el modelo EUROSEM, consideran que la tasa de desprendimiento por impacto de lluvia  $D_i$  es función de la energía cinética que tiene la lluvia al golpear el suelo. Para calcular la energía cinética se tiene en cuenta la energía de la lluvia que cae directamente y la lluvia que cae al suelo después de haber sido interceptada por la vegetación:

$$D_i = \frac{k}{\rho_s} \cdot KE \cdot e^{-z \cdot h} \quad \text{Ecuación 63}$$

$k$  es un índice de erosionabilidad del suelo que se obtiene experimentalmente;  $KE$  es la energía cinética de la lluvia al llegar a la superficie;  $z$  es un exponente que varía entre 0,9 y 3,1 dependiendo de la textura del suelo y  $h$  es la profundidad media de la capa de agua en la superficie.

Para superficies no erosionables (suelos rocosos, cemento...) los autores utilizan esta otra expresión para  $D_i$ :

$$D_i^{pav} = D_i \cdot (1 - PAVE) \quad \text{Ecuación 64}$$

$PAVE$  es la fracción (entre 0 y 1) de superficie cubierta por suelos no erosionables.

Morgan et al. proponen una formulación para la tasa de desprendimiento por flujo basada en una teoría de erosión-deposición general formulada por Smith et al., 1995:

$$D_F = w \cdot v_s \cdot (TC - C) \quad \text{Ecuación 65}$$

$w$  es la anchura del flujo, este modelo supone que la erosión por flujo se da preferentemente en los regueros;  $v_s$  es la velocidad de caída de las partículas;  $TC$  es la capacidad de transporte del flujo y  $C$  es la concentración de sedimentos en el flujo.

Si el valor de la tasa de desprendimiento por flujo  $D_F$  es positivo ocurre erosión del suelo. Por el contrario si el valor es negativo entonces se produce deposición de material.

La capacidad de transporte de la escorrentía es expresada en términos de concentración. Para flujo en regueros la capacidad de transporte se basa en las relaciones extraídas del trabajo de Govers (1990):

$$TC = c \cdot (\omega - \omega_{cr})^\eta \quad \text{Ecuación 66}$$

$$\omega = 10 \cdot u \cdot S \quad \text{Ecuación 67}$$

$u$  es la velocidad media del flujo;  $S$  es la pendiente (%);  $\omega_{cr}$  es el valor crítico de  $\omega$  que corresponde con el inicio del movimiento;  $c$  y  $\eta$  son coeficientes experimentales que dependen del tamaño del sedimento.

Para el flujo en la zona entre regueros, Morgan et al., proponen la siguiente expresión extraída de los trabajos de Everaert (1991), válida para partículas con tamaños comprendidos desde 33 hasta 390  $\mu m$ :

$$TC = \frac{b}{\rho_s \cdot q} \cdot \left[ (\Omega - \Omega_c)^{0.7/n} - 1 \right]^5 \quad \text{Ecuación 68}$$

$b$  es un parámetro función del tamaño de los sedimentos;  $\rho_s$  es la densidad de los sedimentos y  $q$  es el caudal unitario de escorrentía.

$$\Omega = \frac{(U^* \cdot u)^{3/2}}{h^{2/3}} \quad \text{Ecuación 69}$$

$U^*$  es la velocidad de corte;  $\Omega_c$  se calcula con la aplicación del valor de la velocidad de corte crítica de Shields  $U_{c*}$  en la fórmula 63.

$$U_{c*} = \sqrt{y_c \cdot (\rho_s - 1) \cdot g \cdot d_{50}} \quad \text{Ecuación 70}$$

• El modelo KINEROS modeliza los procesos que actúan en el fenómeno erosivo con las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned} \text{Si } q > 0 \quad D_i &= c_f \cdot k(h) \cdot r \cdot q \\ \text{Si } q < 0 \quad D_i &= 0 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 71}$$

$D_i$  es la tasa de erosión por salpicadura de la lluvia [ $L^2/T$ ];  $c_f$  es una constante referida a las propiedades del suelo y de la superficie;  $r$  es la intensidad de precipitación [ $L/T$ ];  $q$  es el caudal [ $L^2/T$ ].  $k(h)$  es un factor reductor de la intensidad de desprendimiento debido al incremento de la lámina de agua. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$k(h) = e^{-c_h \cdot h} \quad \text{Ecuación 72}$$

$c_h$  es un parámetro que tiene en cuenta la humectación del suelo por parte de la lámina de agua;  $h$  es la altura de la lámina.

La tasa de erosión por flujo  $D_f$  se describe con la siguiente expresión:

$$D_f = c_g \cdot (C_{\max} - C) \cdot A \quad \text{Ecuación 73}$$

$c_g$  es un coeficiente de transferencia [ $T^{-1}$ ]. Cuando se produce deposición es igual a la velocidad de caída de las partículas dividida entre la altura de lámina de agua.  $C_{\max}$  es la concentración en equilibrio con la capacidad de transporte [ $L^3/L^3$ ];  $C$  es la concentración local presente [ $L^3/L^3$ ];  $A$  es el área mojada del flujo [ $L^2$ ].

La capacidad de transporte propuesta en este modelo es una generalización de diferentes expresiones. Se basa en los trabajos de Julien and Simons (1985):

$$T_C = C_{\max} \cdot q = \omega \cdot S^\beta \cdot q^\gamma \cdot r^\lambda \cdot \left[ 1 - \frac{\tau_c}{\tau} \right]^\epsilon \quad \text{Ecuación 74}$$

$T_C$  es la capacidad de transporte [ $L^2/T$ ];  $q$  es el caudal unitario [ $L^2/T$ ];  $\omega$  es un coeficiente;  $S$  es la pendiente de la ladera;  $r$  es la intensidad de precipitación [ $L/T$ ];  $\tau$  y  $\tau_c$  son la tensión tangencial de fondo y la tensión tangencial crítica.



### 3. JUSTIFICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL MODELO PROPUESTO

Para poder determinar la erosión hídrica producida en un evento de lluvia, es necesario emplear un modelo que intente cuantificar los procesos que controlan la producción de sedimentos y aborde el cálculo de la producción de éstos en períodos de tiempo pequeños. Como ya se ha mencionado en el apartado 2.2.2 los modelos que cumplen estas condiciones son los llamados de base física. Es por este motivo que el modelo elegido para realizar este trabajo ha sido uno de este tipo. Además se ha escogido un modelo donde la erosión no es permanente en el tiempo; ya que al igual que el caudal, la producción de sedimentos se presenta de manera irregular en el tiempo.

El proceso de producción de sedimentos se encuentra controlado, además de por factores físicos de la zona de estudio (litología, uso del suelo, pendiente...), por las condiciones hidrológicas e hidráulicas (precipitación y escurrimiento). Por esta razón, si se quiere estimar dicha producción, el modelo debe tratar de cuantificar el valor de las variables hidráulicas en toda la extensión de la zona de estudio.

La metodología propuesta en este trabajo para calcular la erosión a escala de eventos de lluvia consta de tres partes claramente diferenciadas. La primera consiste en el cálculo de las pérdidas de precipitación bruta. La segunda parte es la transformación de la lluvia neta en escurrimiento y la tercera parte es el cálculo de la producción de sedimento (concentración de sedimentos en el flujo o caudal sólido). Además de estas tres partes, determinar la erosión necesita de una parametrización de las propiedades físicas de la zona de estudio como paso previo a las partes citadas.

Cabe recordar que el objetivo principal de este estudio es el cálculo de la producción de sedimento; pero para llegar a este fin se hace necesario solucionar las dos primeras partes. El hecho de que el cálculo hidrológico y el erosivo se realicen de manera desacoplada hace necesario que las concentraciones de sedimentos sean pequeñas y no influyan en las características hidráulicas. Si esto sucediera no se podría abordar el cálculo de manera desacoplada y se debería solucionar la hidráulica y la erosión al mismo tiempo.

El cálculo de las pérdidas de precipitación se ha realizado mediante el método del número de curva desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) estadounidense. Se ha escogido este método debido a su sencilla aplicación. Para la transformación lluvia – escurrimiento se ha utilizado la aproximación de onda cinemática de las ecuaciones de Saint Venant. Este método, como se ha mencionado anteriormente, obtiene valores de las diferentes variables hidráulicas de interés en toda la zona de estudio.

El cálculo de la producción de sedimentos se aborda mediante la solución de la ecuación de continuidad de masa de sedimento (ecuación 58). Todos los modelos de erosión no permanente utilizan esta misma ecuación; lo que los diferencia son las expresiones utilizadas para describir el desprendimiento y la capacidad de transporte. En este estudio, para describir los procesos físicos actuantes, se han escogido las expresiones utilizadas por Raveendra et al. debido a la mayor sencillez de su formulación y a que presentan menor número de parámetros.

Tanto la parametrización previa de la cuenca de estudio como los procesos de transformación de la lluvia en escurrimiento y el cálculo del fenómeno erosivo se han programado mediante el software MATLAB 2007b. Los códigos de los programas creados se pueden consultar en el anejo 3. Se ha decidido programar el modelo y no utilizar alguno de los descritos en el apartado 2.2.2.3 (a pesar de que algunos son gratuitos), porque de esta manera se hace más sencilla su utilización. Además realizando los programas se conoce su formulación matemática y en caso de aparición de errores o problemas es más sencilla su resolución.

Las principales diferencias entre el modelo propuesto y los modelos CREAMS y WEEP es que éstos han sido originalmente ideados para calcular la erosión en una ladera unidimensional<sup>4</sup> mientras que el modelo propuesto considera la cuenca de estudio bidimensionalmente. El modelo KINEROS si que considera la erosión en cuencas (no en laderas) y de los presentados en el apartado 2.2.2.3 es el que presenta más similitudes con el modelo propuesto en este estudio. Una de las diferencias existentes entre estos dos modelos es que KINEROS simplifica cada cuenca o subcuenca como un plano inclinado con características físicas homogéneas y el modelo propuesto discretiza la cuenca en celdas de características homogéneas (ver apartado siguiente) pudiéndose conseguir de esta manera un nivel más alto de detalle en la descripción de las características físicas.

### 3.1 PARAMETRIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO

Si se quieren tener en cuenta las variaciones espaciales de las características físicas de la cuenca, que controlan tanto los fenómenos puramente hidrológicos como los erosivos; se hace necesaria una parametrización de dichas características y propiedades de la cuenca de estudio. En este estudio esta parametrización se lleva a cabo mediante el empleo de técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), y se realiza discretizando la cuenca en celdas cuadradas de una determinada longitud y a las que se atribuyen características físicas homogéneas (Gráfico 4 A).

A partir de un modelo de elevación digital del terreno se delimita, en primer lugar, la cuenca objeto de estudio. Es necesario que el modelo digital no tenga depresiones; es decir, que todos los puntos de la cuenca desagüen por gravedad en el punto de salida. Si no se dieran estas características, no sería posible calcular la escorrentía mediante la aproximación de onda cinemática que es la empleada en este modelo (ver apartado 3.3). Posteriormente y mediante la aplicación de herramientas SIG se obtienen las orientaciones y pendientes de cada celda a partir del modelo de elevaciones.

El valor de la pendiente de cada celda es un promedio entre la pendiente en la dirección  $x$  y la pendiente en la dirección  $y$  según las expresiones que se muestran a continuación. La orientación de cada celda se obtiene comprobando hacia que dirección de las ocho posibles se da el máximo descenso de cota respecto al de la celda y asignándole el valor correspondiente (Gráfico 4 B).

$$S = \tan^{-1} \left( \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \right) \quad \text{Ecuación 75}$$

$$S_x = (z_3 + 2 \cdot z_6 + z_9 - z_1 - 2 \cdot z_4 - z_7) / 8 \cdot C \quad \text{Ecuación 76}$$

$$S_y = (z_1 + 2 \cdot z_2 + z_3 - z_7 - 2 \cdot z_8 - z_9) / 8 \cdot C \quad \text{Ecuación 77}$$

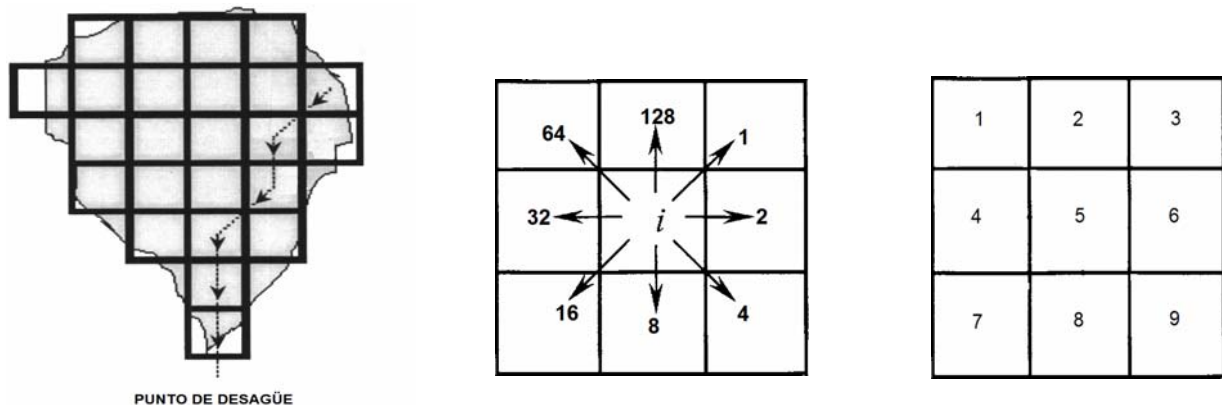
Donde  $S$  es la pendiente de la celda expresada como ángulo,  $S_x$  y  $S_y$  son las pendientes en la dirección  $x$  e  $y$  respectivamente. Los valores  $z_i$  corresponden a las cotas de las celdas adyacentes.  $C$  corresponde al tamaño de lado de la celda expresado en metros (Gráfico 4 C).

Con la orientación se conoce la dirección del flujo y mediante la técnica descrita por Smith and Brilly (1992) se ordenan las celdas para obtener los diferentes *caminos* (*flowpaths*) que sigue el flujo (Gráfico 4 A). La ordenación de las celdas de la cuenca de estudio se ha programado con el software MATLAB.

El cálculo de la transformación de la lluvia neta en escorrentía se realiza considerando dos tipos de flujo: flujo hortoniano donde el caudal se distribuye uniformemente a lo ancho del terreno y flujo canalizado en regueros. Para determinar que tipo de flujo presenta cada celda se observa la presencia o no de regueros en la realidad mediante inspección visual o mediante fotografía digital. Si se da el caso de flujo canalizado se determinan las características geométricas (ancho de la base y ángulo de los

<sup>4</sup> El modelo WEEP tiene un parametrizador de cuencas (TOPAZ) que transforma una cuenca en una ladera promedio. Además de ser una simplificación, este parametrizador es muy inestable y presenta dificultades para poder ser ejecutado.

taludes) y se representan tanto la presencia o no de regueros como sus características (ancho de la base y ángulo del talud) de manera matricial.



**Gráfico 4:** A) Discretización espacial de una cuenca con un posible sendero de flujo B) Direcciones de flujo consideradas y valor de la celda en la matriz de orientaciones según dirección C) Numeración de las celdas adyacentes para el cálculo de la pendiente de la celda 5

Como en el caso de la orientación y la pendiente todos los parámetros que intervienen en la modelización del fenómeno hidrológico y erosivo (como pueden ser el coeficiente de fricción, el coeficiente de erosionabilidad, el de cubierta del suelo y la presencia o no de regueros así como las características geométricas de estos) se representan en forma matricial; para, como se ha comentado antes, poder representar las variaciones que puedan tener dichos parámetros en la zona de estudio. De estas características físicas de la cuenca se hablará más extensamente en el apartado de caracterización de la cuenca de estudio.

De las propiedades o características físicas que se parametrizan en este apartado, el modelo necesita como valores de entrada: un grid de pendientes adimensionales, un grid de orientaciones, un grid de rugosidades del terreno, un grid de parámetros  $K$  de erosionabilidad del terreno, un grid de parámetros  $C$  de cubierta vegetal, un grid que indique que zonas presentan flujo hortoniano y cuales flujo canalizado y un grid que determine la geometría de los regueros en caso de que existan.

### 3.2 CÁLCULO DE LAS PÉRDIDAS DE PRECIPITACIÓN

Cuando se produce un evento de precipitación (lluvia bruta), son diversos los procesos que disminuyen la cantidad de agua disponible para convertirse en escorrentía superficial (lluvia neta). Se pueden citar la evaporación, la evapotranspiración, la interceptación, la infiltración y el almacenamiento en depresiones como los principales fenómenos causantes de pérdidas de precipitación. El método escogido en este estudio para calcular las pérdidas de precipitación es el método del número de curva (CN) desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) de Estados Unidos en el año 1972. Se ha escogido este método debido a su sencillez (solo necesita un parámetro), ya que el objetivo de este trabajo no es modelizar a la perfección la hidrología de una cuenca urbana de cabecera sino encontrar una metodología que nos permita estimar la erosión hídrica que sufre dicha cuenca. Este método se basa en la siguiente hipótesis:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a}$$

Ecuación 78

Donde  $F_a$  son las pérdidas de precipitación acumuladas,  $S$  es el almacenamiento máximo potencial de la cuenca,  $P_e$  es la precipitación neta o efectiva,  $P$  es la precipitación bruta o total e  $I_a$  es la abstracción inicial. Si se tiene en cuenta la ecuación de continuidad  $P = P_e + I_a + F_a$  y se opera en la ecuación 78 se llega a la siguiente expresión para determinar las pérdidas de precipitación:

$$\text{Si } P \geq I_a \quad F_a = \frac{S \cdot (P - I_a)}{P - I_a + S}$$

Ecuación 79

$$\text{Si } P < I_a \quad F_a = 0$$

A través del análisis de datos experimentales el SCS llegó a la conclusión de que en promedio  $I_a = 0.2 S$ . La relación entre la lluvia bruta y la lluvia neta se determina a través del CN. Este parámetro depende de las condiciones antecedentes de humedad, del tipo de suelo y del uso de que se le da a este. El CN varía entre 0 y 100. Para una superficie totalmente impermeable (donde la lluvia bruta sería igual a la lluvia neta) el valor de CN es 100. Generalmente en terrenos naturales el CN es menor que 100. El almacenamiento  $S$  expresado en milímetros puede calcularse en función del CN a través de la siguiente expresión:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Ecuación 80

### 3.3 TRANSFORMACIÓN LLUVIA - ESCORRENTÍA

Una vez se han cuantificado las pérdidas de precipitación bruta, el modelo aborda el fenómeno de la transformación de la precipitación neta en caudal o escorrentía. Este cálculo hidrológico se realiza solucionando las ecuaciones de Saint Venant mediante la aproximación de onda cinemática. La aproximación de la onda cinemática solo tiene en cuenta las fuerzas gravitatorias y las de fricción; además no puede reproducir la influencia del flujo desde aguas abajo y no es capaz de simular el proceso de laminación. El método de la onda cinemática se utiliza para modelizar dos tipos diferentes de comportamiento de la escorrentía, flujo a lo ancho del terreno y flujo canalizado en regueros. Las ecuaciones de gobierno generales de la aproximación de la onda cinemática se muestran a continuación:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = F$$

Ecuación 81

$$S_f = S = \frac{n^2 \cdot Q^2}{A^2 \cdot R_H^{4/3}}$$

Ecuación 82

Donde  $A$  es el área mojada [ $L^2$ ],  $Q$  es el caudal [ $L^3/T$ ],  $F$  es la intensidad de precipitación neta [ $L/T$ ],  $S$  es la pendiente [ $L/L$ ],  $n$  es el parámetro de fricción y  $R_H$  es el radio hidráulico [ $L$ ] y  $S_f$  es la pendiente motriz [ $L/L$ ].

Una cuenca objeto de estudio se puede dividir en dos zonas en función del comportamiento de la escorrentía. Cuando se produce un evento de precipitación en primer lugar el agua fluye a lo ancho de toda la superficie en forma de lámina delgada. Generalmente este comportamiento del flujo se da en las áreas más elevadas de las cuencas y es conocido como flujo hortoniano. En estas zonas, el comportamiento de la escorrentía se calcula mediante un caudal unitario; y el área, así como el radio hidráulico, son iguales al calado. Con estas premisas las ecuaciones 81 y 82 toman la siguiente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f \quad \text{Ecuación 83}$$

$$q = \alpha \cdot h^m \quad \text{Ecuación 84}$$

Donde  $h$  es la altura del flujo respecto la superficie [L];  $\alpha$  y  $m$  son los coeficientes que relacionan la altura de flujo con el caudal;  $r$  es la intensidad de precipitación [L/T] y  $f$  son las pérdidas de precipitación [L/T]. Si se utiliza la fórmula de Manning se obtiene que  $\alpha = S^{0.5}/n$  y  $m = 5/3$  donde  $S$  es la pendiente de la ladera [L/L] y  $n$  es el parámetro de fricción de Manning.

Aplicando la regla de la cadena, la ecuación 83 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial h}{\partial q} \cdot \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f \quad \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial h} \cdot \frac{\partial q}{\partial x} = \frac{\partial q}{\partial h} \cdot (r - f) \quad \text{Ecuación 85}$$

Donde  $\partial q / \partial h$  es la celeridad  $c$  con que se propaga una perturbación, su valor se obtiene derivando la ecuación 84 respecto al calado y es igual a  $5 \cdot q / 3 \cdot h$ . Si se despeja el calado en dicha ecuación, se puede expresar el valor de la celeridad  $c$  de la siguiente manera:

$$c = \frac{\partial q}{\partial h} = \frac{5}{3} \cdot \frac{S^{3/10}}{n^{3/5}} \cdot q^{2/5} = \mu \cdot q^\kappa \quad \text{Ecuación 86}$$

Existen zonas donde el comportamiento de la escorrentía no se puede modelar con las ecuaciones anteriormente expuestas ya que el flujo no se desarrolla repartido a lo ancho de la superficie, sino que se canaliza en pequeños cursos de agua. Para modelizar este tipo de flujo se debe tener en cuenta la geometría del curso en cuestión. Las ecuaciones de gobierno en lugar de emplear el caudal unitario y el calado, utilizan el caudal y el área mojada:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = (r - f) \cdot L \quad \text{Ecuación 87}$$

$$Q = \beta \cdot A^\eta \quad \text{Ecuación 88}$$

Donde  $A$  es el área mojada [L<sup>2</sup>];  $\beta$  y  $\eta$  son los coeficientes que relacionan el área con el caudal y dependen de la pendiente, la fricción y la geometría de la sección;  $r$  es la intensidad de precipitación [L<sup>2</sup>/T],  $f$  son las pérdidas de precipitación [L<sup>2</sup>/T] y  $L$  es el ancho de celda considerado [L].

Aplicando la regla de la cadena, la ecuación 87 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$\frac{\partial A}{\partial Q} \cdot \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = (r - f) \cdot L \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial A} \cdot (r - f) \cdot L \quad \text{Ecuación 89}$$

Donde  $\partial Q / \partial A$  como en el caso de flujo hortoniano es la celeridad  $c$  a la que se desplaza una onda y su valor se obtiene derivando la expresión 88 respecto al área

Los parámetros  $\beta$  y  $\eta$  de la ecuación 88 se obtienen expresando el caudal en función del área en la ecuación de Manning. Esto implica que se debe saber como varía el perímetro mojado respecto a la variación de área. El modelo creado acepta diferentes tipos de geometrías (variando el ancho de los regueros y el ángulo de los taludes de éstos). Expresa el perímetro mojado como una función del área mediante un ajuste potencial aplicando el método de los mínimos cuadrados ( $P = b \cdot A^m$ ). En función de la geometría de los regueros se tendrá un valor u otro de  $b$  y  $m$ .

$$Q = \frac{S^{1/2} \cdot A^{5/3}}{n \cdot (b \cdot A^m)^{2/3}} \quad \text{Ecuación 90}$$

De esta expresión se deduce el valor de los parámetros  $\beta$  y  $\eta$ :

$$\beta = \frac{S^{1/2}}{n \cdot b^{2/3}} \quad \text{Ecuación 91}$$

$$\eta = \frac{5}{3} - \frac{2 \cdot m}{3} \quad \text{Ecuación 92}$$

Derivando la ecuación 88 respecto al área se obtiene el valor de la celeridad:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} = \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m \right) \cdot \left( \frac{S^{1/2}}{n \cdot b^{2/3}} \right) \cdot A^{\left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m - 1 \right)} \quad \text{Ecuación 93}$$

Operando en la ecuación 90 se obtiene la siguiente expresión:

$$A = \left( \frac{Q \cdot n \cdot b^{2/3}}{S^{1/2}} \right)^{1/\left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m \right)} \quad \text{Ecuación 94}$$

Combinando las expresiones 93 y 94 se obtiene una formulación de la celeridad  $c$  que depende del caudal:

$$\frac{\partial Q}{\partial A} = \omega \cdot Q^\omega \quad \text{Ecuación 95}$$

Donde:

$$\omega = \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m \right) \cdot \left( \frac{S^{1/2}}{n \cdot b^{2/3}} \right) \cdot \left( \frac{n \cdot b^{2/3}}{S^{1/2}} \right)^{\left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m - 1 \right) / \left( \frac{5}{3} - \frac{2}{3} \cdot m \right)} \quad \text{Ecuación 96}$$

$$\chi = \frac{\left( \frac{5}{3} - \frac{2 \cdot m}{3} - 1 \right)}{\left( \frac{5}{3} - \frac{2 \cdot m}{3} \right)}$$

Ecuación 97

En realidad cabe decir, que cuando se usa la aproximación de la onda cinemática para flujo canalizado, no se modeliza el fenómeno de transformación de la lluvia en escorrentía en sentido estricto. Esta manera de modelizar el flujo se asemeja más al fenómeno de propagación de caudales que no a la transformación de lluvia en escorrentía.

### Resolución numérica del método de la onda cinemática

La resolución en el espacio y en el tiempo de las ecuaciones de gobierno del método de la onda cinemática se realiza mediante un esquema implícito de diferencias finitas. Empleando este tipo de esquema mostrado en el Gráfico 5 y teniendo en cuenta el desarrollo algebraico mostrado anteriormente, las ecuaciones 85 y 89 adquieren la siguiente forma:

$$\frac{q_{i+1}^{j+1} - q_{i+1}^j}{\Delta t} + \mu \cdot (q_{i+1}^{j+1})^\kappa \cdot \frac{q_{i+1}^{j+1} - q_i^{j+1}}{\Delta x} = \mu \cdot (q_{i+1}^{j+1})^\kappa \cdot (r - f)$$

Ecuación 98

$$\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{\Delta t} + \omega \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^\chi \cdot \frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_i^{j+1}}{\Delta x} = \omega \cdot (Q_{i+1}^{j+1})^\chi \cdot (r - f) \cdot L$$

Ecuación 99

En función del tipo de flujo que se presente en cada celda se utiliza una o otra ecuación. Por ejemplo si la celda en cuestión presenta flujo canalizado se resolverá la ecuación 99. Para encontrar una solución a las ecuaciones se deben utilizar condiciones de contorno e iniciales. Las condiciones de contorno consideradas son caudal nulo en las celdas donde empiezan los senderos de flujo ( $q(0, t) = 0$ ); y para el resto se considera que el caudal en la posición inicial de la celda es igual a la suma del caudal final de las celdas que le aportan flujo ( $q_2(0, t) = \sum q_i(x_f, t)$ ). Las condiciones iniciales consideran caudal igual a 0 en el instante cero ( $q(x, 0) = 0$  o  $h(x, 0) = 0$ ) para todas las celdas del dominio de estudio.

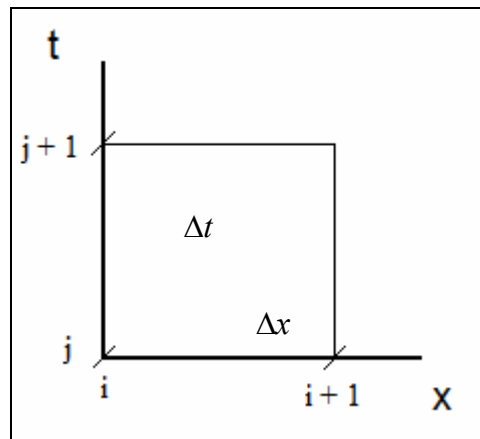


Gráfico 5: Malla de diferencias finitas.

Si se tienen en cuenta las condiciones de contorno e iniciales la única incógnita en las ecuaciones 98 y 99 es el valor del caudal en el punto  $i+1, j+1$  de la malla. Estos valores se calculan en todas las celdas del dominio y para cada instante de tiempo y cada incremento de posición mediante el método iterativo de Newton-Raphson. A continuación se muestra el algoritmo usado por este método para la ecuación 98, análogamente la ecuación 99 presenta un algoritmo que tiene en cuenta el caudal en vez del caudal unitario:

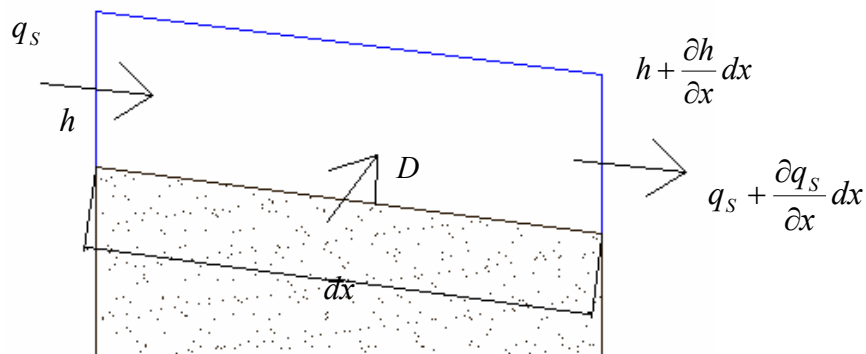
$$(q_{i+1}^{j+1})_{k+1} = (q_{i+1}^{j+1})_k - \frac{f(q_{i+1}^{j+1})}{f'(q_{i+1}^{j+1})} \quad \text{Ecuación 100}$$

Una vez resuelta las ecuaciones para todos los puntos de cada celda y para todas las celdas; se calculan los valores de calado, de velocidad y de la tensión tangencial. El calado se obtiene despejando el calado en la ecuación 84 y la velocidad dividiendo el caudal unitario entre el calado para las celdas que presentan flujo hortoniano. En las celdas con flujo canalizado se calcula en primer lugar el área mojada mediante la ecuación 94 y a partir de este valor y de la geometría dada se obtiene el valor del calado. La velocidad se calcula dividiendo el caudal entre el área mojada. Las tensiones de fondo se calculan mediante la fórmula para todas las celdas:

$$\tau = \gamma \cdot R_H \cdot S \quad \text{Ecuación 101}$$

### 3.4 CÁLCULO DE LA PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Este cálculo se basa en el principio de continuidad de la masa de sedimento. Como en cualquier principio de conservación de la masa, en un volumen de control los aportes de sedimentos menos las pérdidas son iguales a la variación de almacenamiento de sedimento dentro del mismo.



**Gráfico 6:** Esquema de la producción de sedimentos en un volumen de control.

El volumen ocupado por el agua por unidad de anchura se expresa como:



$$V = \left( h + \frac{\partial h}{\partial x} dx + h \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot dx \approx h dx \quad (\text{despreciando infinitésimos de 2º orden})$$

La cantidad de sedimento presente en el volumen de control se obtiene multiplicando el volumen de agua  $V$  por la concentración másica de sedimentos  $C$ . La variación en la masa de sedimento en un infinitesimal de tiempo se expresa como:

$$\frac{\partial(Chdx)}{\partial t} dt$$

Si se considera que no se produce deposición, las entradas menos las salidas de sedimento en el volumen de control en un diferencial de tiempo se describen con la siguiente expresión:

$$q_s dt + D dx dt - \left( q_s + \frac{\partial q_s}{\partial x} dx \right) dt$$

Donde  $D$  es el desprendimiento producido en el terreno. Operando los términos y aplicando el principio de continuidad en la masa de sedimento se obtiene la ecuación:

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} dx dt + \frac{\partial(Ch)}{\partial t} dx dt = D dx dt \quad \text{Ecuación 102}$$

Considerando que el calado es el producto del caudal por el inverso de la velocidad y que la concentración es el producto del caudal sólido unitario por el inverso del caudal, se obtiene la ecuación de gobierno en el proceso erosivo es la propuesta por Foster y Meyer (1972) y por Bennet (1974).

$$\frac{\partial q_s}{\partial x} + \frac{\partial(q_s / v)}{\partial t} = D_I + D_F \quad \text{Ecuación 103}$$

Donde  $q_s$  es el caudal sólido unitario [M/T],  $v$  es la velocidad del flujo [L/T],  $D_I$  y  $D_F$  son las tasas de desprendimiento de sedimentos por impacto de lluvia y por flujo respectivamente [M/L<sup>2</sup>.T] (se utilizan las expresiones utilizadas en el modelo de Raveendra et al., 2007):

$$D_I = \xi_I \cdot K \cdot C \cdot r^2 \cdot (1 - h / h_m) \cdot (2.96 \cdot S^{0.79} + 0.56)$$

Donde  $\xi_I$  es un factor calibrable del desprendimiento por impacto de la lluvia,  $K$  es el coeficiente de erosionabilidad del suelo de la USLE,  $C$  es el coeficiente de cubierta del suelo de la USLE,  $r$  es la intensidad de precipitación [L/T],  $h$  es la altura de flujo o calado [L],  $h_m$  es la altura de penetración de una gota en un flujo de agua (es función de la intensidad de precipitación) y  $S$  es la pendiente [L/L]. La fórmula expresada tiene validez cuando la penetración de las gotas de la lluvia sea mayor que el calado, en caso contrario se considera nulo el desprendimiento por impacto de la lluvia.

$$D_F = \xi_F \cdot C \cdot K \cdot \tau^{1.5}$$

Donde  $\xi_F$  al igual que en el desprendimiento por impacto es un factor calibrable y  $\tau$  es la tensión tangencial media de fondo.

Las expresiones del desprendimiento, tanto el de impacto de lluvia como el de flujo, son de naturaleza empírica ya que dependen de parámetros experimentales. Al aplicar las fórmulas en diferentes zonas (con características físicas distintas que en la zona de experimentación) se obtienen resultados que la mayoría de las veces no se corresponden con la realidad y se hace necesaria la realización de un proceso de calibración y de validación. Es por este motivo que las dos expresiones de producción de sedimento incorporan parámetros de calibración. Según Raveendra (2007), que llevó a cabo diferentes experimentaciones en 4 cuencas indias y 2 estadounidenses, los valores de estos parámetros de calibración varían entre 0.000025 y 0.0021 para el desprendimiento por impacto y entre 0.0003 y 0.021 para el desprendimiento por flujo.

Como en la ecuación de continuidad no se considera la deposición como posible pérdida de masa de sedimento, se incorpora esta posibilidad admitiendo una capacidad máxima de transporte de sedimento. Esto se realiza comparando el caudal sólido con la capacidad de transporte del flujo, (determinada con las fórmulas utilizadas por Raveendra et al., 2007).

$$\begin{aligned} \text{Si } q \leq 0.046 \text{ m}^3/\text{minuto} \quad T_F &= \xi_{tc} \cdot C \cdot S \cdot q^{0.5} \\ \text{Si } q > 0.046 \text{ m}^3/\text{minuto} \quad T_F &= 101.4 \cdot \xi_{tc} \cdot C \cdot S \cdot q^2 \end{aligned}$$

Si el caudal sólido es superior a la capacidad de transporte se considera que tiene lugar deposición de sedimento; ésta se considera igual al exceso de caudal sólido respecto la capacidad de transporte y se iguala el caudal sólido a la capacidad de transporte calculada. Al igual que en las expresiones de desprendimiento, la formulación de la capacidad de transporte también incorpora un parámetro de calibración ( $\xi_{tc}$ ). Citando al mismo autor este valor se encuentra comprendido entre 1 y 10.

El hecho de modelizar el acarreo de sedimentos mediante un caudal unitario dificulta la simulación del fenómeno erosivo en las celdas donde se ha considerado un flujo canalizado (calculadas mediante un caudal total). Para solucionar este problema se ha considerado un ancho medio por el que circula el flujo. Éste se calcula como el ancho de un rectángulo con área igual a la mojada y altura igual al calado independientemente de la geometría de la sección transversal.

En las celdas con flujo canalizado el ancho de la celda por donde se produce desprendimiento se reduce al ancho por donde circula el flujo canalizado. En la realidad se presentan los dos tipos de flujo: hortoniano y canalizado; y se desprecia el desprendimiento por flujo hortoniano. Despreciar la acción erosiva del flujo hortoniano en estas celdas no tiene una importancia significativa en el resultado, ya que, como se podrá comprobar más adelante, la mayor parte del desprendimiento del sedimento se produce por acción del flujo canalizado.

Como último comentario de este apartado, destacar que el caudal sólido de este modelo no diferencia entre las formas que tiene un flujo para transportar sólido (básicamente transporte de fondo y en suspensión); es decir, se trata de un caudal sólido total.

### **Resolución numérica de la ecuación de continuidad de sedimento**

Teniendo en cuenta la discretización espacial y temporal expuesta en el Gráfico 5 y aplicando dos esquemas explícitos, la versión discretizada de la ecuación de continuidad de la carga de sedimentos adquiere la siguiente forma:

$$\frac{q_{Si+1}^{j+1} - q_{Si}^{j+1}}{\Delta x} + \frac{(q_S/v)_i^{j+1} - (q_S/v)_i^j}{\Delta t} = (D_I + D_F)_{i+1}^{j+1} \quad \text{Ecuación 104}$$

$$\frac{q_{Si+1}^j - q_{Si}^j}{\Delta x} + \frac{(q_S/v)_{i+1}^{j+1} - (q_S/v)_{i+1}^j}{\Delta t} = (D_I + D_F)_{i+1}^{j+1} \quad \text{Ecuación 105}$$

Aplicando condiciones de contorno e iniciales similares a las utilizadas en el cálculo hidrológico (caudal sólido inicial nulo; caudal sólido en los contornos de la cuenca nulo y en el punto inicial de cualquier celda interior, caudal sólido igual a la suma de caudales sólidos de las celdas que vierten en ella), estas expresiones solo tiene como valor desconocido al caudal sólido en el punto  $i+1, j+1$ .

Mediante el criterio del número de Courant se determina cuál de las dos ecuaciones recién mostradas se emplea para calcular el caudal sólido. Este criterio se aplica para garantizar la estabilidad del esquema explícito. El número de Courant  $C$  viene dado por la siguiente expresión; para números de Courant mayores que uno se emplea la primera ecuación y para valores menores o iguales a uno se emplea la segunda ecuación.

$$C = \frac{\left(\frac{5}{3}\right) \cdot \left(S^{0.5} / n\right) \cdot h^{\left(\frac{5}{3}\right)-1}}{\Delta x / \Delta t}$$

Ecuación 106

Donde  $S$  es la pendiente,  $n$  el parámetro de fricción,  $h$  la altura de agua,  $\Delta x$  es la distancia de discretización espacial de la zona de estudio y  $\Delta t$  es el tiempo de discretización.



## 4. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

La metodología seguida para llevar a cabo este estudio se comenta a continuación. En primer lugar con la ayuda de la cartografía disponible, de ortofotografía y de visitas de campo a la zona se han parametrizado las propiedades físicas de las cuencas de estudio. Una vez caracterizadas correctamente las cuencas de estudio se procede a modelar su comportamiento hidrológico. Las lluvias escogidas para realizar tal fin han sido lluvias sintéticas de duración igual a una hora y de periodo de retorno dos, cinco, diez, veinte, cincuenta, cien y quinientos años. Estas lluvias sintéticas se han construido mediante el método de los bloques alternados y se han calculado las pérdidas de precipitación mediante el método del número de curva.

Una vez solucionada la parte hidrológica de las cuencas se procede al cálculo de la producción de sedimentos por parte de la cuenca a nivel de evento. Para conocer la incertidumbre asociada al modelo erosivo se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros de dicho modelo. Los resultados del cálculo erosivo se han comparado con el valor de sedimentos calculado con la ecuación MUSLE. Con los resultados de dicha comparación del modelo erosivo se ha predicho la generación de sedimentos de las cuencas de estudio durante un año. Este valor de erosión anual se ha comparado con el obtenido mediante la ecuación USLE.

### 4.1 DESCRIPCIÓN Y PARAMETRIZACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO

El presente estudio se ha realizado en dos cuencas de cabecera de la red de colectores de la ciudad de Barcelona. Ambas se encuentran situadas en la Sierra de Collserola (Cordillera Litoral Catalana). En la Imagen 1 se puede ver la ubicación exacta de las dos cuencas.

La primera cuenca de estudio desagua en el colector interceptor de rieras que discurre paralelo a la Ronda de Dalt. Exactamente se encuentra situada al norte de dicha ronda en las proximidades de la plaza Karl Marx. Tiene una extensión aproximada de 58 hectáreas con una cota máxima de 323 metros y mínima de 130 metros. En su interior se encuentra ubicado el antiguo hospital de Sant Llàtzer y la masia Can Masdeu. Por este motivo esta cuenca se denominará cuenca Masdeu (marcada en rojo en la Imagen 1). La segunda cuenca de estudio se encuentra situada en el barrio de Montbau, tiene una extensión aproximada de 14 hectáreas, una cota máxima de 420 metros y una mínima de 187.5 metros. En su interior se sitúa el torrent d'en Genaret. De aquí en adelante a esta cuenca se le llamará cuenca Montbau (marcada en azul en la Imagen 1).

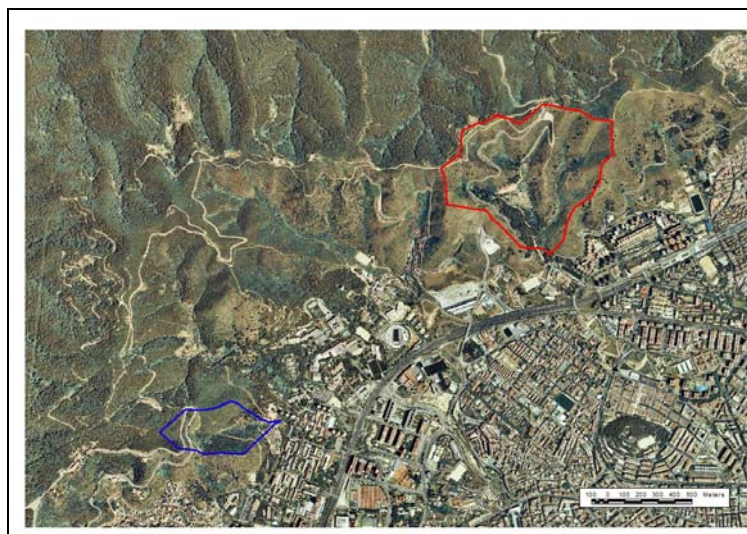


Imagen 1: Ubicación de las cuencas de estudio.

Geológicamente la sierra de Collserola es un horst (elevación tectónica) donde afloran materiales del sustrato Paleozoico y Mesozoico. Concretamente en la cuenca Masdeu se encuentran tres tipos de materiales; pórfidos ácidos de edad carbonífera – pérmica, granodioritas y granitos alcalinos de la misma edad geológica y filitas y cornubianitas del cámbrico - ordoviciano. Los suelos presentes son del tipo Entisoles, suelos muy poco evolucionados y con propiedades ampliamente determinadas (heredadas) por el material original (litología). Según la cartografía de usos del suelo del *Institut Cartogràfic de Catalunya* (ICC) la zona de estudio presenta dos usos del suelo: *Prats i bosc d'aciculifolis*. El primer uso de suelo se presenta en aproximadamente 52 ha y el segundo en 6 ha de la extensión total de la cuenca. Teniendo en cuenta la ortofotografía se pueden observar como mínimo un uso más del suelo: suelo urbano (carreteras y edificaciones).



Imagen 2: Planta cuenca Masdeu.

En la cuenca Montbau solamente se tiene filitas y cornubianitas del cámbrico - ordoviciano como litología. La clase de suelos es la misma que en la cuenca Masdeu. Respecto a los usos de suelo la cartografía del ICC muestra tres diferentes: *prats* (11.5 hectáreas), *urbanitzacions* (0.08 hectáreas) i *bosc d'escleròfil·les* (2.2 hectáreas). Teniendo en cuenta la ortofotografía se puede observar un uso más: carreteras y caminos.

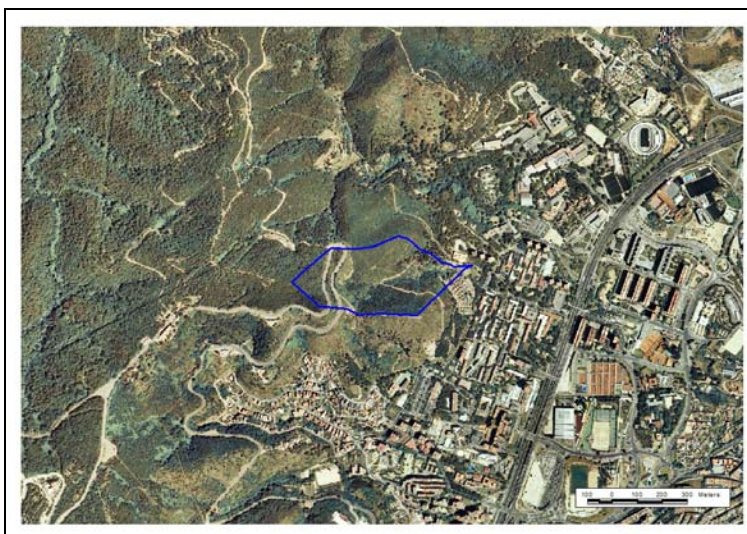


Imagen 3: Planta cuenca Montbau.



Para representar la cartografía de la cuenca se ha creado un modelo digital del terreno (MDT) a partir de la cartografía 1:5000 del ICC. En primer lugar se ha construido un MDT, de tamaño de celda 10 metros para la cuenca Masdeu y 5 metros para la cuenca Montbau; a partir de un TIN (*Triangular Irregular Network*). Para poder trabajar más rápidamente se ha decidido construir otro MDT de 25 metros (Imagen 4 A) y utilizar este tamaño de celda como el característico para el estudio de la cuenca Masdeu. Mediante la metodología descrita en el apartado 3.1 se ha creado un grid de pendientes (Imagen 6) y otro de orientaciones (Imagen 5).

A partir de la observación mediante ortofotografía se ha comprobado la existencia de regueros. Es en esta zona, donde a priori se produce un flujo de agua canalizado. La ubicación de estos regueros se puede ver coloreada de azul en la Imagen 7. Para poder precisar las características geométricas de dichos canales (principalmente ancho de los regueros) es necesario realizar una inspección visual de la zona in-situ. Para la modelización de la cuenca se han considerado regueros con sección transversal de forma trapecial de ancho de base igual a un metro. El ángulo de talud se ha considerado de 60°.

Otro parámetro que controla el comportamiento hidráulico del flujo y por consiguiente uno de los inputs que se debe proporcionar al modelo, es el parámetro de fricción. En este estudio se ha considerado un valor de 0.1 en las celdas que presentan flujo hortoniano y de 0.035 en las celdas donde el flujo se produce de manera canalizada. Las celdas que presentan flujo canalizado son aquellas en las que se ha determinado la existencia de regueros (Imagen 7).

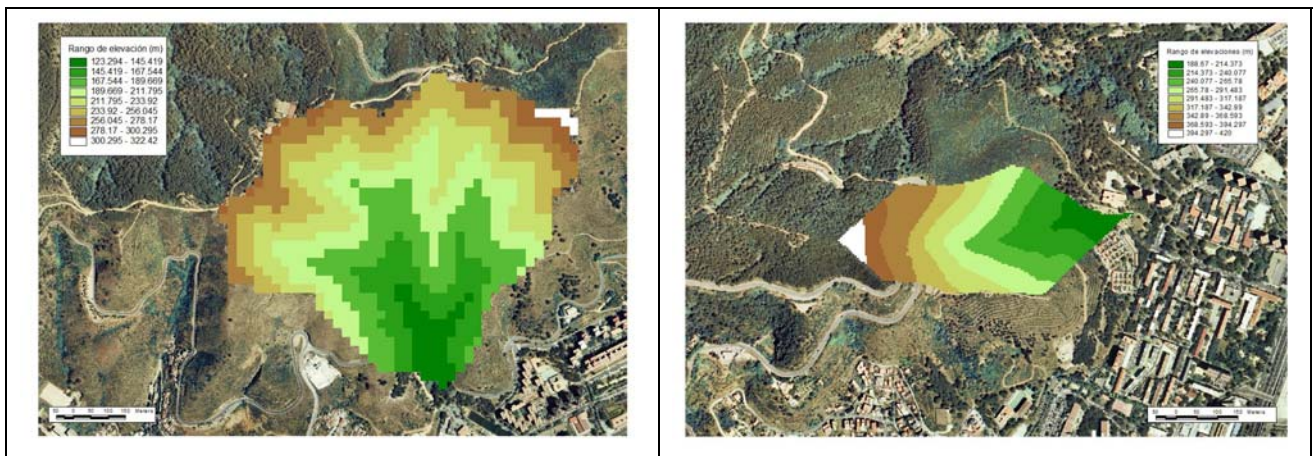


Imagen 4: Modelos digitales de elevaciones. A) Masdeu celdas de 25 metros y B) Montbau celdas de 5 metros.

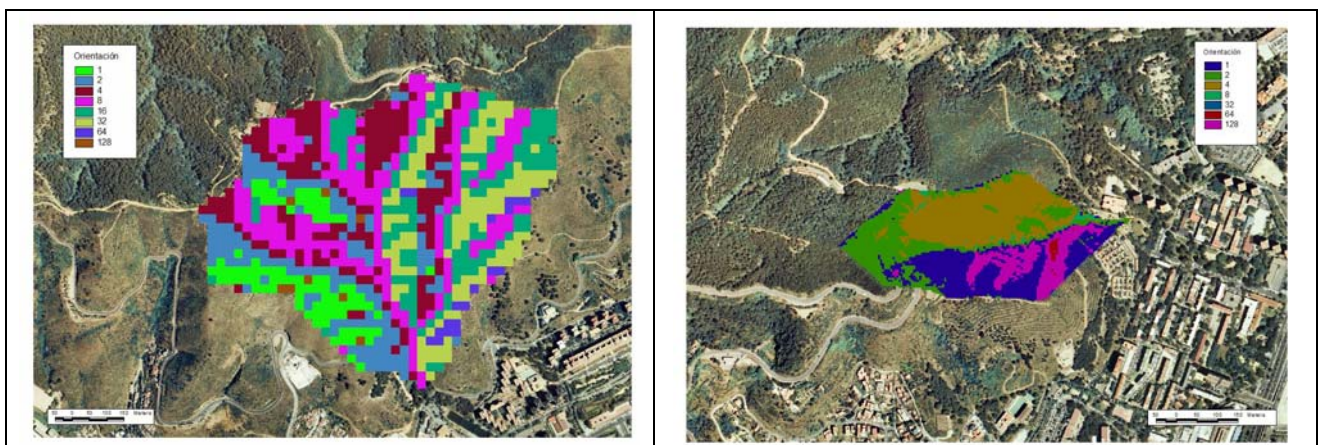


Imagen 5: Grid de orientaciones para cada celda. A) Masdeu y B) Montbau.



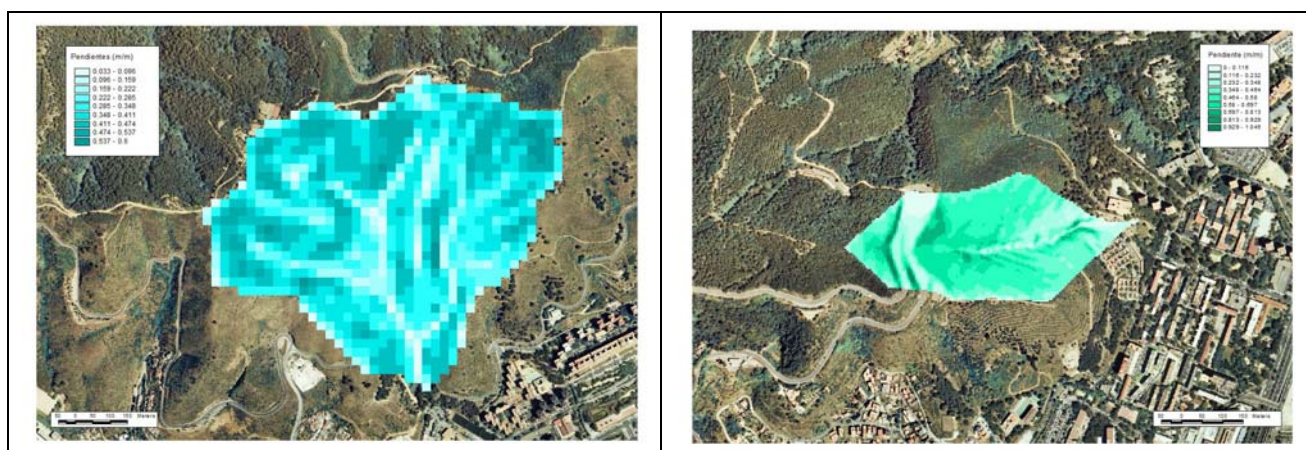


Imagen 6: Grid de pendientes medias de cada celda (m/m). A) Masdeu y B) Montbau.

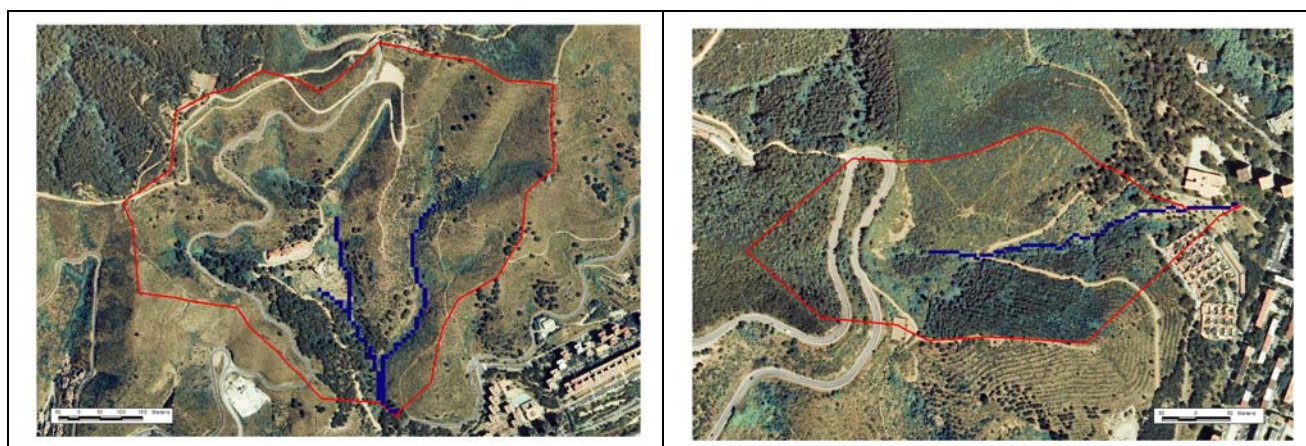


Imagen 7: Localización de los regueros en la cuenca (línea azul). A) Masdeu y B) Montbau

Como ya se ha comentado en el apartado dedicado a la descripción del modelo erosivo existen dos parámetros que nos definen el comportamiento del suelo ante el fenómeno erosivo. Uno es el parámetro de erosionabilidad del suelo de la USLE ( $K$ ) y el otro es el parámetro de cubierta vegetal de la misma ecuación ( $C$ ). Para la definición del valor a usar en nuestras cuencas del parámetro  $C$  se ha tenido en cuenta el uso del suelo y el estado de la cubierta vegetal. Este análisis se ha desarrollado con el uso de la fotografía aérea ya que la cartografía de usos del suelo del ICC no presenta información suficiente.

Los valores del coeficiente de cubierta vegetal  $C$  se encuentran tabulados en la siguiente tabla definida por Wischmeier (1975):

Tipo	% Cobertura aérea	% Cobertura superficial					
		0	20	40	60	80	>95
Zonas poco o nada arboladas		0,45	0,24	0,15	0,091	0,043	0,011
Plantas herbáceas o matorral bajo (0,5 cm)	25	0,36	0,2	0,13	0,083	0,041	0,011
	50	0,26	0,16	0,11	0,076	0,039	0,011
	75	0,17	0,12	0,09	0,068	0,038	0,011
Matorral (de 0,5 a 4 m)	25	0,4	0,22	0,14	0,087	0,042	0,011
	50	0,34	0,19	0,13	0,082	0,041	0,011



Tipo	% Cobertura aérea	% Cobertura superficial					
		0	20	40	60	80	>95
	75	0,28	0,17	0,12	0,078	0,04	0,011
Arbolado joven con matorral escaso (altura de caída del agua 4 m).	25	0,42	0,23	0,14	0,089	0,042	0,011
	50	0,39	0,21	0,14	0,087	0,042	0,011
	75	0,36	0,2	0,13	0,084	0,042	0,011
Zonas arboladas		% Cobertura superficial					
				40	70	90	100
Bosques con densidad baja	20			0,009			
	40				0,003		
Bosques claros	40				0,003		
	75					0,002	
Bosques densos	75					0,002	
	100						0,001

**Tabla 4:** Valores del parámetro  $C$  de cubierta vegetal de la USLE.

De acuerdo con los valores expuestos en la Tabla 4 y con los usos del suelo antes mencionados; en las cuencas de estudio se obtienen los siguientes valores para el parámetro  $C$ , con un valor ponderado con el área de 0.11 para ambas:

Uso del suelo	Vegetación	$C$	Área (ha)
Bosque	Arbolado	0.084	5.9
Prado	Matorral	0.13	41.2
Prado	Matorral denso	0.082	19.5
Urbano	-	0	1.6
Urbano	-	0.45	0.12

**Tabla 5:** Valores de  $C$  en la cuenca de estudio Masdeu.

Uso del suelo	Vegetación	$C$	Área (ha)
Prado	Matorral	0.13	5.97
Prado	Matorral denso	0.082	5.61
Bosque	Arbolado	0.084	2.92
Urbano	-	0.45	0.91
Urbano	-	0	0.76
Urbano	-	0	0.24

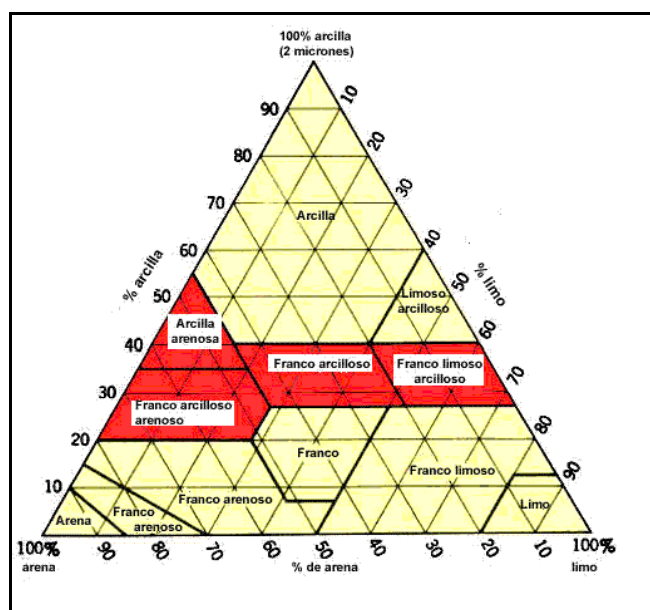
**Tabla 6:** Valores de  $C$  en la cuenca de estudio Montbau.

El valor del coeficiente de erosionabilidad se puede deducir a partir de la composición granulométrica y de otras propiedades físicas del suelo (permeabilidad y estructura del suelo) tal y como se explica en el apartado 2.1.5. Si no se disponen de muestras de suelo de la zona en cuestión se pueden utilizar diferentes tablas donde se relaciona el valor de  $K$  con características del suelo. A continuación se muestra una tabla donde se relaciona el parámetro  $K$  con la textura del suelo.

% Materia Orgánica	Media	< 2 %	> 2 %
Clase textural			
Arcilla	0.029	0.032	0.028
Franco arcilloso	0.04	0.043	0.037
Franco arenoso grueso	0.009	--	0.009
Arena fina	0.011	0.012	0.008
Franco arenoso fino	0.024	0.029	0.022
Arcilla pesada	0.022	0.025	0.02
Franco	0.04	0.045	0.034
Arenoso franco fino	0.014	0.02	0.012
Arenoso franco	0.005	0.007	0.005
Arenoso franco muy fino	0.051	0.058	0.033
Arena	0.003	0.004	0.001
Franco arcilloso arenoso	0.026	--	0.026
Franco arenoso	0.017	0.018	0.016
Franco limoso	0.05	0.054	0.049
Arcilla limosa	0.034	0.036	0.034
Franco arcilloso limoso	0.042	0.046	0.04
Arena muy fina	0.057	0.061	0.049
Franco arenoso muy fino	0.046	0.054	0.043

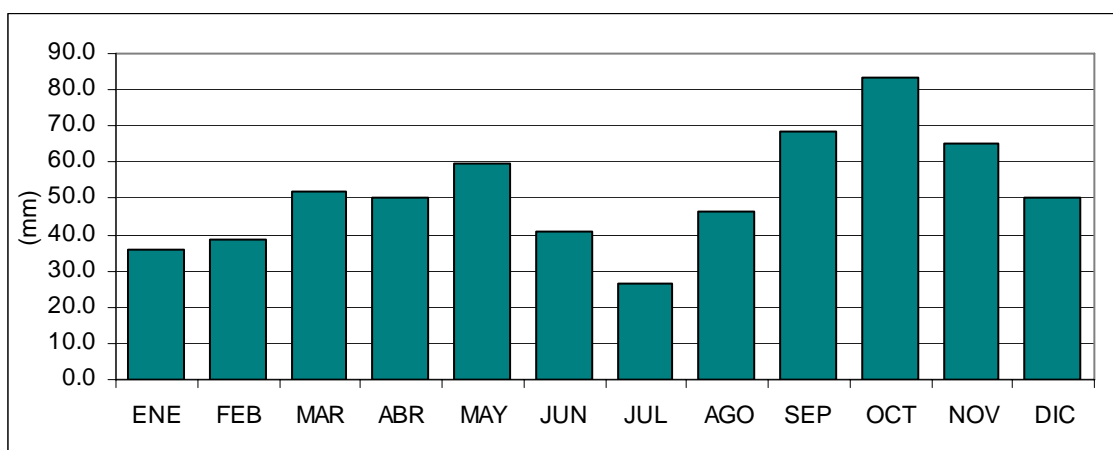
**Tabla 7:** Parámetros de erosionabilidad  $K$  de la USLE en función de la clase textural del suelo.

La tabla, que clasifica según la clase textural del suelo, se ha encontrado en la página web del gobierno de Ontario. El coeficiente  $K$  se encuentra expresado en  $(\text{Kg.h/N.m}^2)$  o lo que es lo mismo  $(\text{t.ha.h/ha.MJ.mm})$ . Para suelos de características similares a los presentes en la zona de estudio Rodríguez et al (2004) proponen un valor de  $0.058 \text{ Kg.h/N.m}^2$ . Para poder apreciar exactamente cuál es la clase textural del suelo se debe realizar una visita de campo. En el siguiente gráfico se pueden apreciar las diferentes clases texturales en función del contenido de arcilla, arena y limo:



**Gráfico 7:** Clases texturales según granulometría del suelo.

El régimen pluviométrico de Barcelona es el típico del litoral mediterráneo. Los periodos del año con mayor precipitación son la primavera y el otoño. Además de presentarse irregularmente a lo largo del año, la precipitación en este entorno geográfico suele producirse de manera torrencial. La precipitación media anual se encuentra alrededor de los 620 mm. En el siguiente gráfico se pueden observar las precipitaciones medias mensuales en la ciudad de Barcelona. Estos datos se han obtenido del registro de datos del pluviómetro totalizador del Observatorio Fabra (1914-1993) y de los valores medios de la red de pluviómetros de CLABSA (1994-1997):



**Gráfico 8:** Precipitaciones medias mensuales para el periodo 1914 – 1997 en la ciudad de Barcelona

Como ya se ha explicado en el apartado 3.2 las pérdidas de precipitación se calculan mediante la metodología del número de curva (*CN*). Este parámetro depende del uso del suelo, del tipo de suelo, de la pendiente y de las condiciones antecedentes de humedad. El tipo de suelo viene determinado por la geología de la zona. Realizando técnicas de procesamiento espacial de datos se obtienen los siguientes resultados en las cuencas objeto de estudio:

Tipo de suelo	Uso del suelo	CN	Área (m2)
Granodioritas	Bosque	68	36110.296
Filitas	Bosque	62	15800.127
Filitas	Sin vegetación	87	7.42
Pórfidos	Prado	76	48909.654
Granodioritas	Prado	76	109068.904
Filitas	Prado	69	366863.517
<b>CN ponderado</b>		<b>71</b>	

**Tabla 8:** Valor del número de curva en función del tipo de suelo y valor ponderado en la cuenca Masdeu.

Tipo de suelo	Uso del suelo	Pendiente	CN	Área (m2)
Filitas	Bosque	<3	62	16
Filitas	Bosque	>3	62	19948
Filitas	Urbano	>3	96	2942
Filitas	Prado	<3	67	117
Filitas	Prado	>3	69	115550
<b>CN ponderado</b>		<b>69</b>		

**Tabla 9:** Valor del número de curva en función del tipo de suelo y valor ponderado en la cuenca Montbau.

Como se puede ver en la Tabla 8 el valor ponderado por el área en la cuenca Masdeu es igual a 71; en consecuencia la cuenca tiene un valor de abstracción inicial para el cálculo de las pérdidas de precipitación  $I_a$  igual a 20.75 mm. Cabe comentar que estos dos parámetros se han calculado para condiciones de humedad normales. Para condiciones de sequedad se tendría un  $CN$  igual a 51 y una  $I_a$  de 48.8 mm y para condiciones húmedas estos parámetros tendrían un valor de 85 y 9 mm respectivamente.

En la Tabla 9 se ve que el número de curva para la cuenca de Montbau es igual a 69 con un valor de abstracción inicial igual a 22.82 mm para condiciones antecedentes de humedad normales. Para condiciones húmedas la abstracción inicial es igual a 11.07 mm y un número de curva igual a 82.

Para la serie de lluvia anual se han considerado los mismos números de curva que los mostrados en los párrafos anteriores. Si en los dos días precedentes a un evento no tiene lugar otro evento de precipitación se consideran las condiciones antecedentes de humedad normales. Si por el contrario, en los dos días precedentes si que ocurre algún evento de precipitación, los parámetros empleados para el cálculo de las pérdidas de precipitación son los correspondientes a las condiciones antecedentes de humedad.

## 4.2 MODELO HIDROLÓGICO

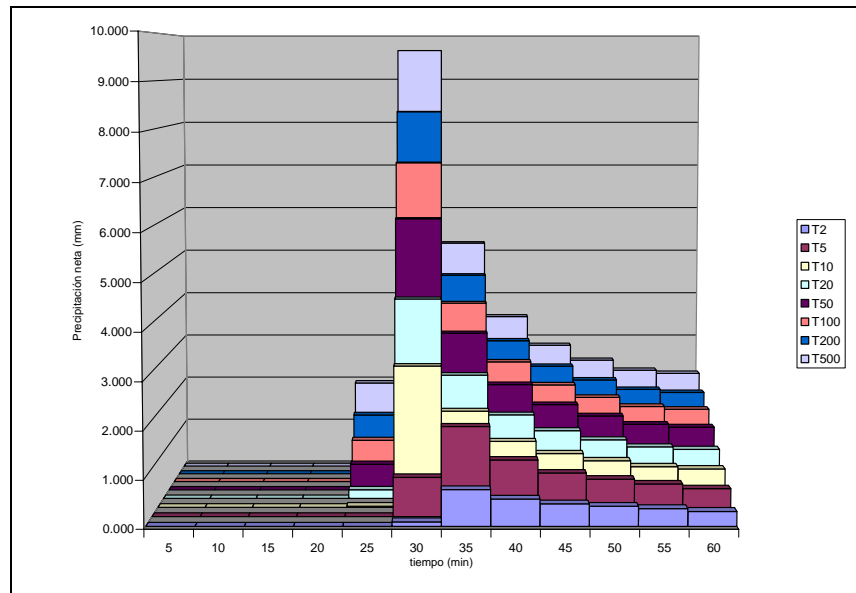
Como ya se ha comentado en apartados anteriores, para poder estimar la producción de erosión en la cuenca de estudio así como el caudal sólido vertido por un suceso de lluvia, se debe conocer previamente la hidrología y el valor de las variables hidráulicas de interés. El modelo hidrológico consta de dos partes diferenciadas. En primer lugar el cálculo de las pérdidas de precipitación mediante el uso de la metodología del número de curva desarrollado por el SCS para cada cuenca de estudio (apartados 3.2 y 4.1); y en segundo lugar, la transformación de la lluvia neta en escorrentía mediante el uso de la aproximación de la onda cinemática (apartado 3.3).

Las lluvias de estudio serán de duración igual a una hora y diferente periodo de retorno (2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años). Se consideran uniformes en toda la cuenca de estudio. De las curvas IDF del observatorio Fabra de Barcelona (ver anejo 1) se extraen los siguientes valores de intensidad que conformarán la precipitación bruta:

Tiempo (min)	T2 años		T5 años		T10 años	
	I (mm/h)	P bruta (mm)	I (mm/h)	P bruta (mm)	I (mm/h)	P bruta (mm)
5	152.3	12.7	188.2	15.7	212.4	17.7
10	116.1	19.3	145.2	24.2	164.9	27.5
15	94.0	23.5	118.6	29.6	135.3	33.8
20	79.5	26.5	100.9	33.6	115.4	38.5
25	69.4	28.9	88.4	36.8	101.3	42.2
30	62.0	31.0	79.1	39.5	90.9	45.4
35	56.3	32.8	71.9	42.0	82.8	48.3
40	51.8	34.5	66.2	44.1	76.3	50.8
45	48.1	36.0	61.5	46.1	70.9	53.2
50	44.9	37.4	57.5	47.9	66.4	55.3
55	42.2	38.6	54.1	49.6	62.5	57.3
60	39.7	39.7	51.1	51.1	59.1	59.1

Tabla 10: Valores de precipitación bruta extraídos de la curva IDF para T2, T5 y T10.

Aplicando el método del número de curva a las lluvias brutas mostradas en la tabla anterior y ordenando la precipitación según la metodología de los bloques alternados se obtienen las siguientes lluvias netas para la cuenca Masdeu:



**Gráfico 9:** Lluvias netas sintéticas cuenca Masdeu. Precipitación neta (mm) vs. tiempo (min).

Las lluvias netas para la cuenca Montbau se pueden ver en el anejo 1. Una vez calculadas las lluvias netas, éstas se introducen en el modelo de onda cinemática y se obtienen los valores de caudal en todo el dominio de estudio. Además del caudal, también se obtienen valores de calado, velocidad y tensión tangencial media. El cálculo hidrológico se realiza con un  $\Delta t$  de 1 o 0.5 minutos (en función de la bondad del balance de masa) y un  $\Delta x$  de 5 metros para las celdas de 25 y de 1 metro para las celdas de 5; la duración total del cálculo será de 4 veces la duración de la lluvia neta. Para comprobar la bondad de los resultados, se compara el volumen saliente en el hidrograma de la celda de desagüe con la precipitación neta caída en la cuenca. Para que los resultados hidrológicos se den como válidos, el error en el volumen de salida no debe ser superior en ningún caso al 5%.

Se realiza también un análisis de sensibilidad de parámetros para comprobar la incertidumbre asociada al cálculo hidrológico. Los parámetros analizados han sido el coeficiente de fricción, la geometría de los regueros y la ubicación de éstos. Aunque no es objetivo de este estudio, los resultados hidrológicos deberían calibrarse con valores de precipitación y de caudal reales para poder eliminar la incertidumbre en el valor de parámetros como el coeficiente de rugosidad del terreno o el valor de las pérdidas de precipitación.

Los resultados hidrológicos dados como válidos se han obtenido considerando regueros de geometría trapezoidal (base 1 metro, ángulo  $60^\circ$ ) y con una distribución como la mostrada en la Imagen 7 A. El coeficiente de fricción para las celdas con flujo hortoniano es igual a 0.1 y 0.035 en las celdas con flujo canalizado. Los siguientes gráficos muestran los hidrogramas en los puntos de desagüe de las dos cuencas de estudio para la lluvia sintética de dos años, cinco, diez, veinte, cincuenta, cien, doscientos y quinientos años de periodo de retorno.

En la cuenca Masdeu, los errores relativos del balance de masa en cálculo hidrológico son del orden del 2%. El escenario de dos años se ha modelizado con un paso de tiempo de un minuto mientras que el resto se ha hecho con un paso de medio minuto.

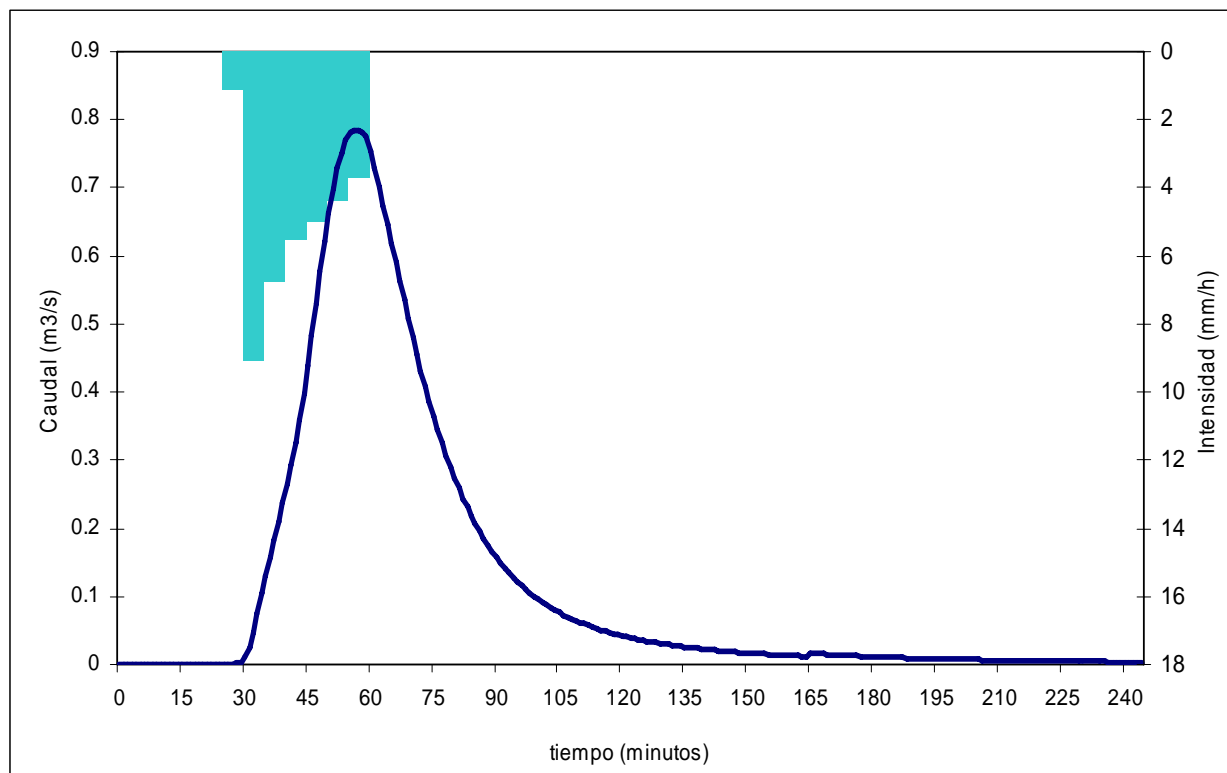


Gráfico 10: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=2 años. Cuenca Masdeu.

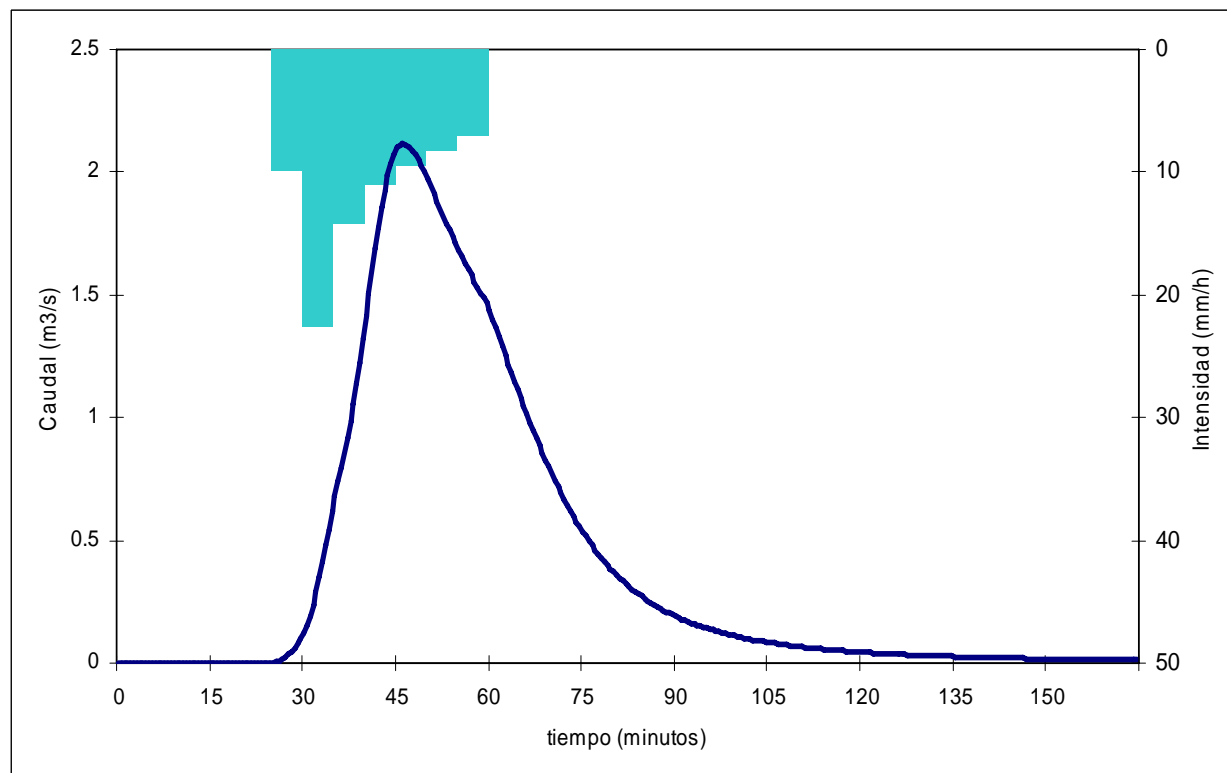


Gráfico 11: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=5 años. Cuenca Masdeu.

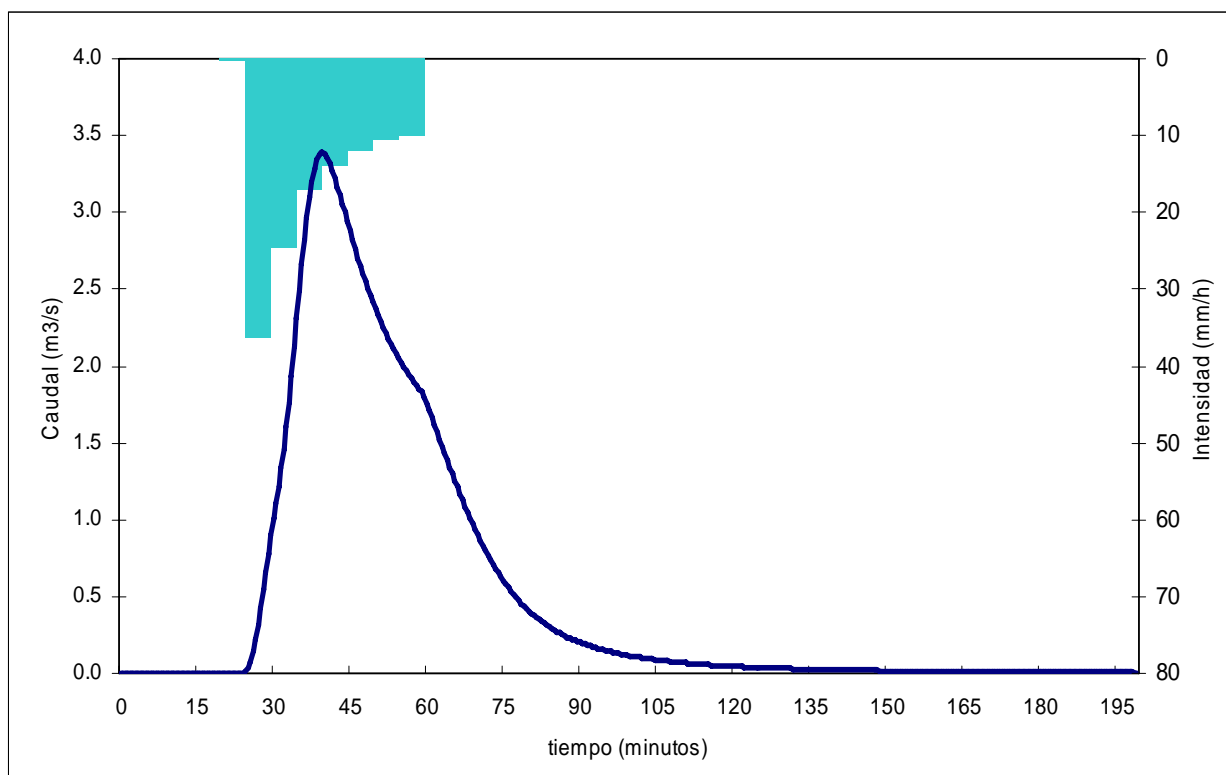


Gráfico 12: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=10 años. Cuenca Masdeu.

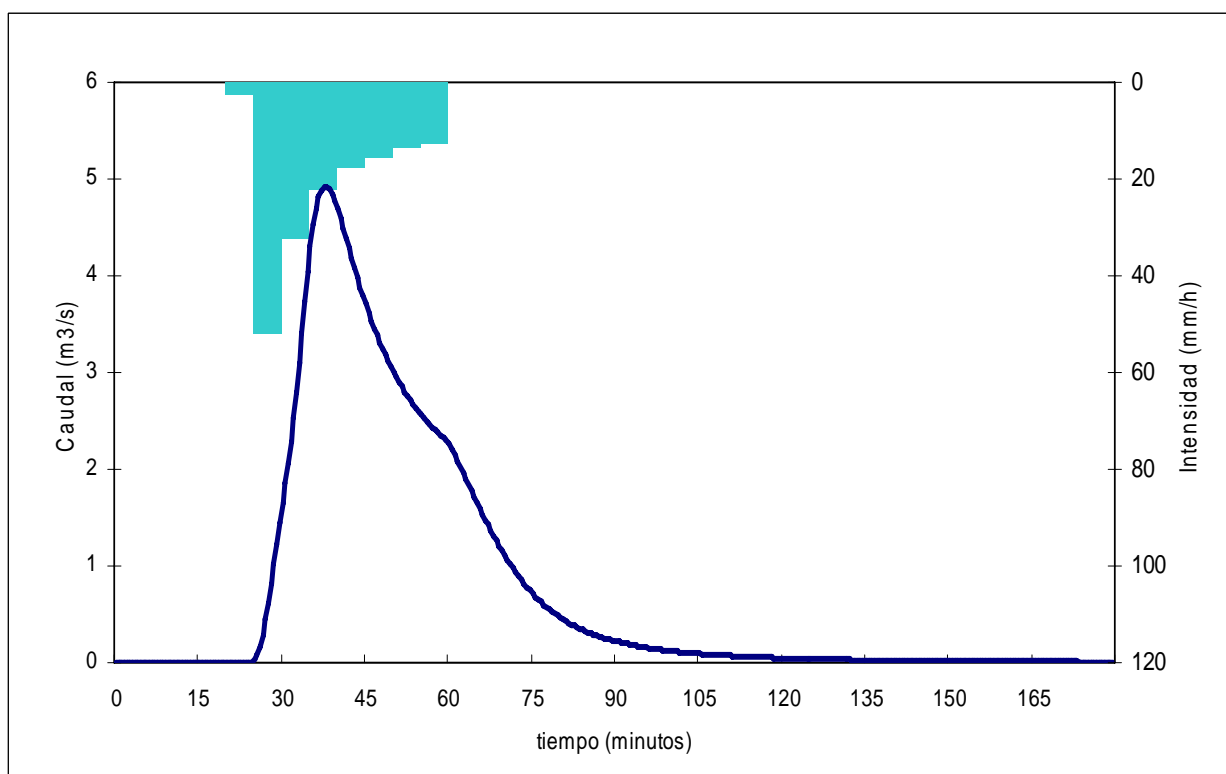
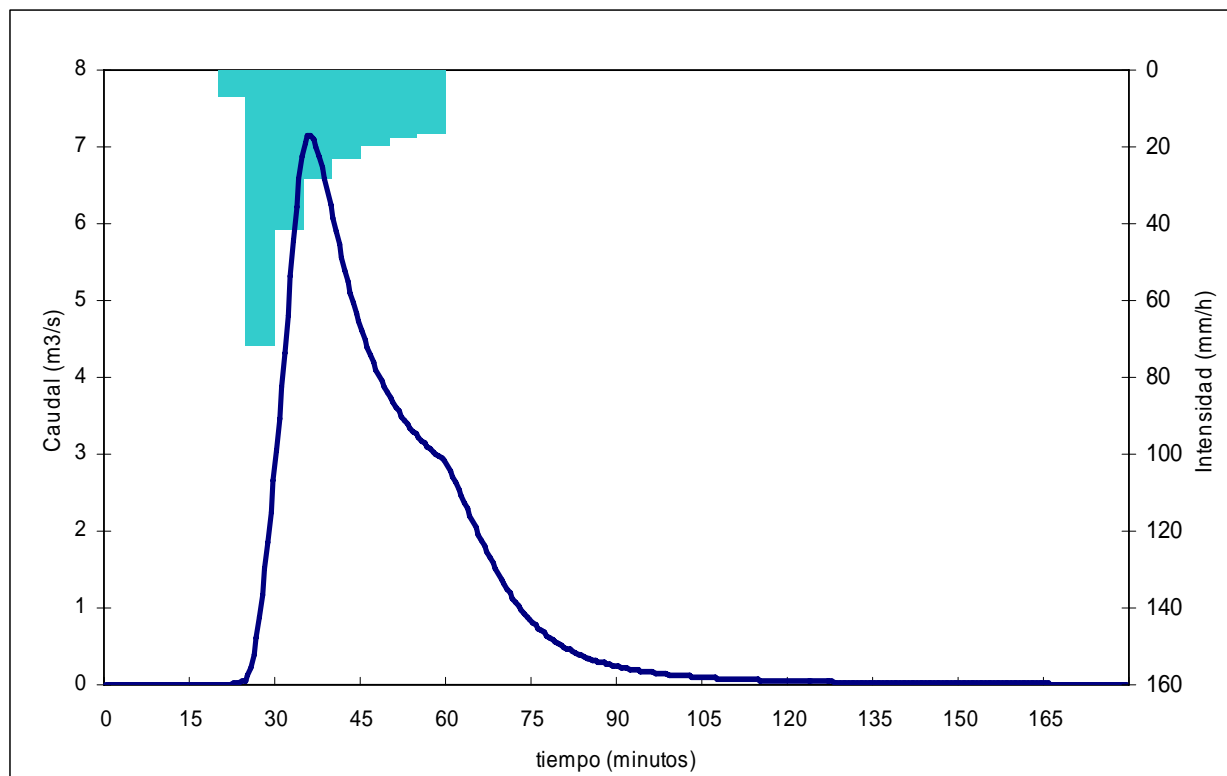
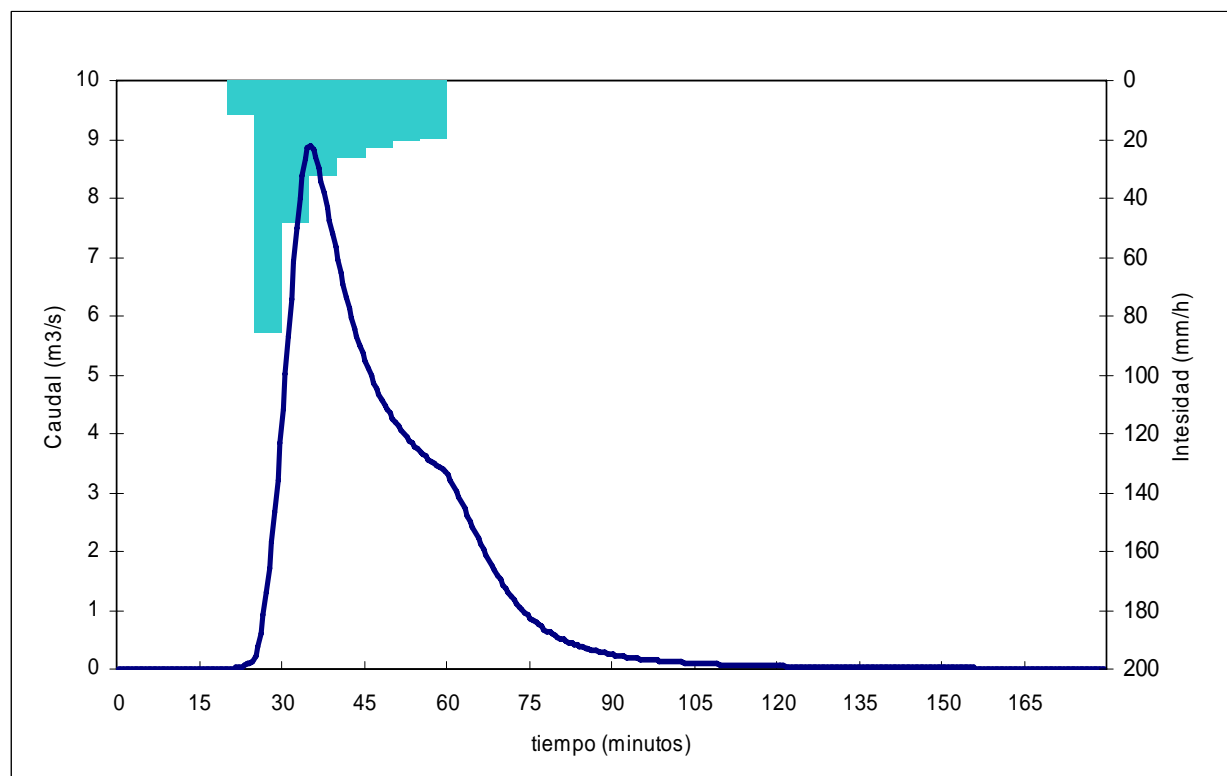


Gráfico 13: Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=20 años. Cuenca Masdeu.

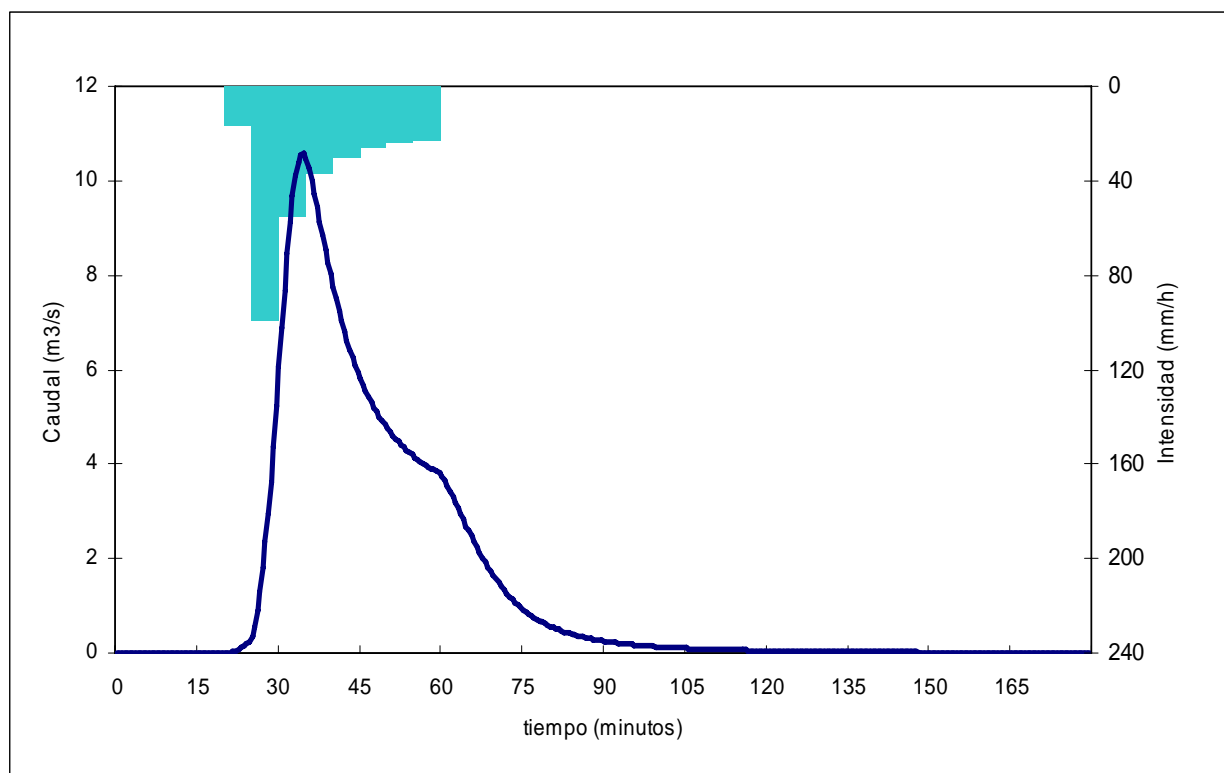


**Gráfico 14:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=50 años. Cuenca Masdeu.

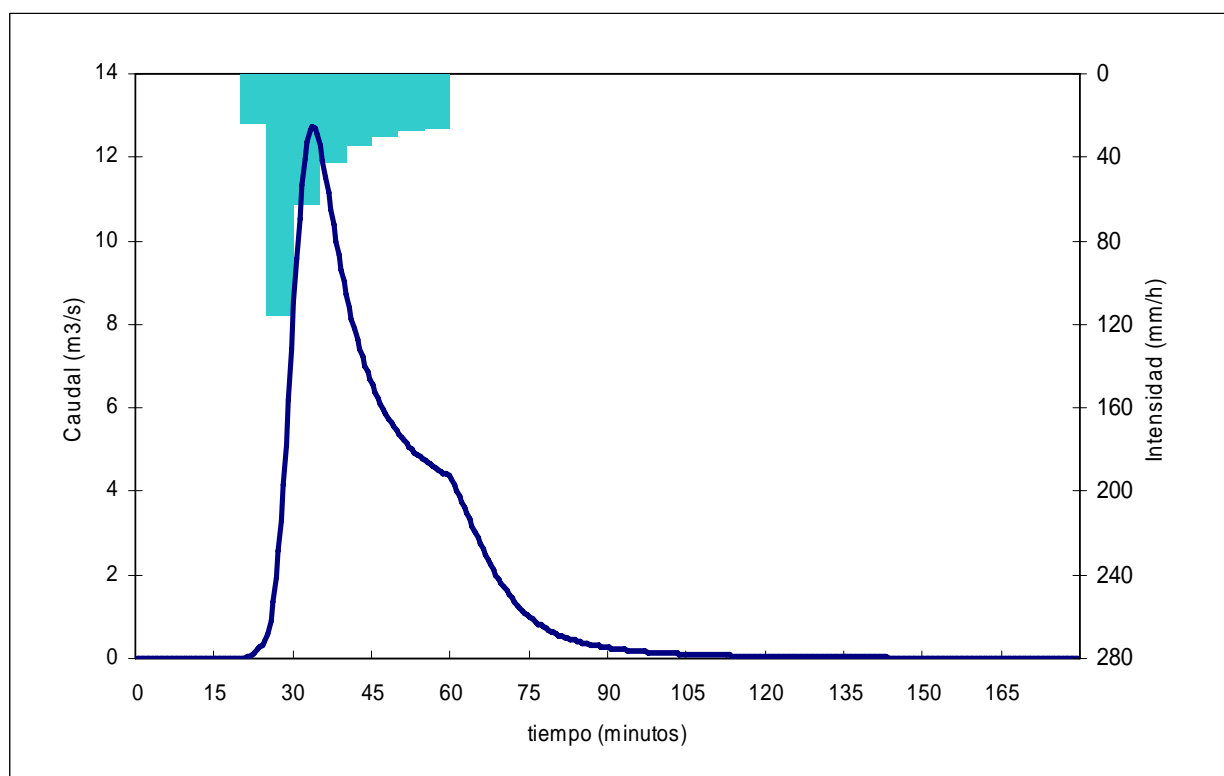


**Gráfico 15:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=100 años. Cuenca Masdeu.

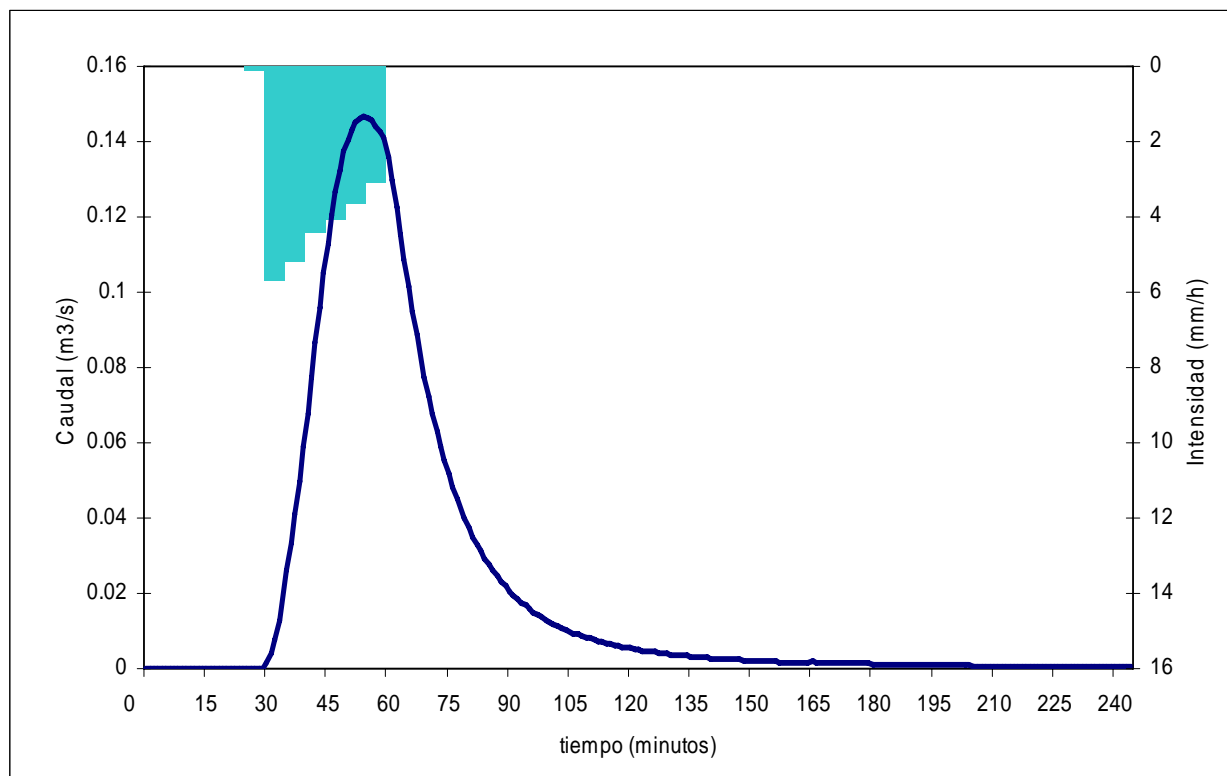




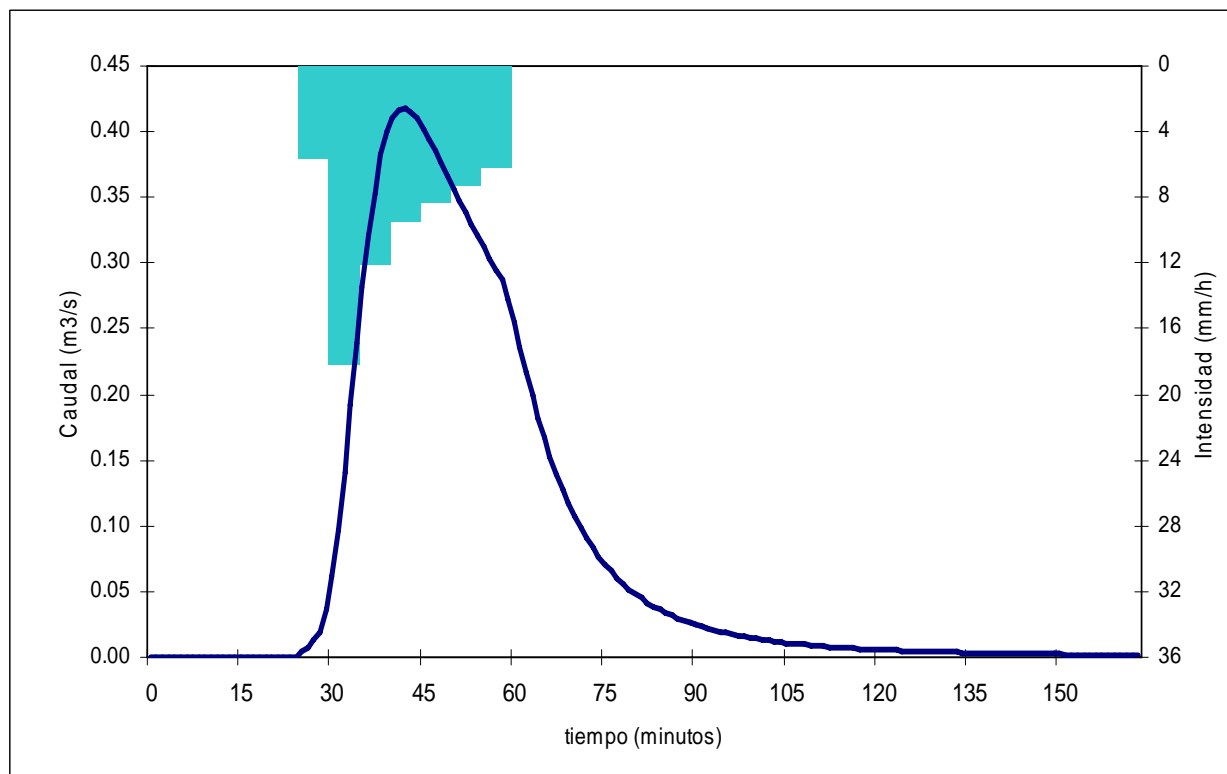
**Gráfico 16:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=200 años. Cuenca Masdeu.



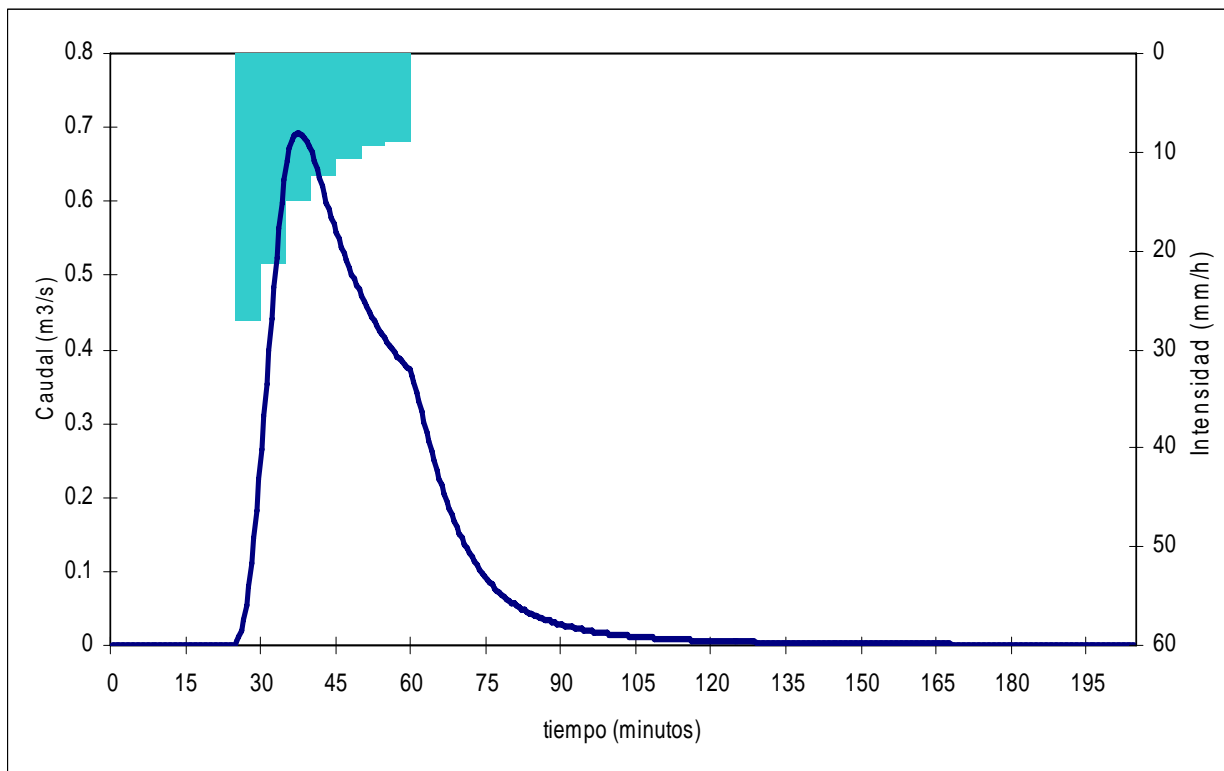
**Gráfico 17:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=500 años. Cuenca Masdeu.



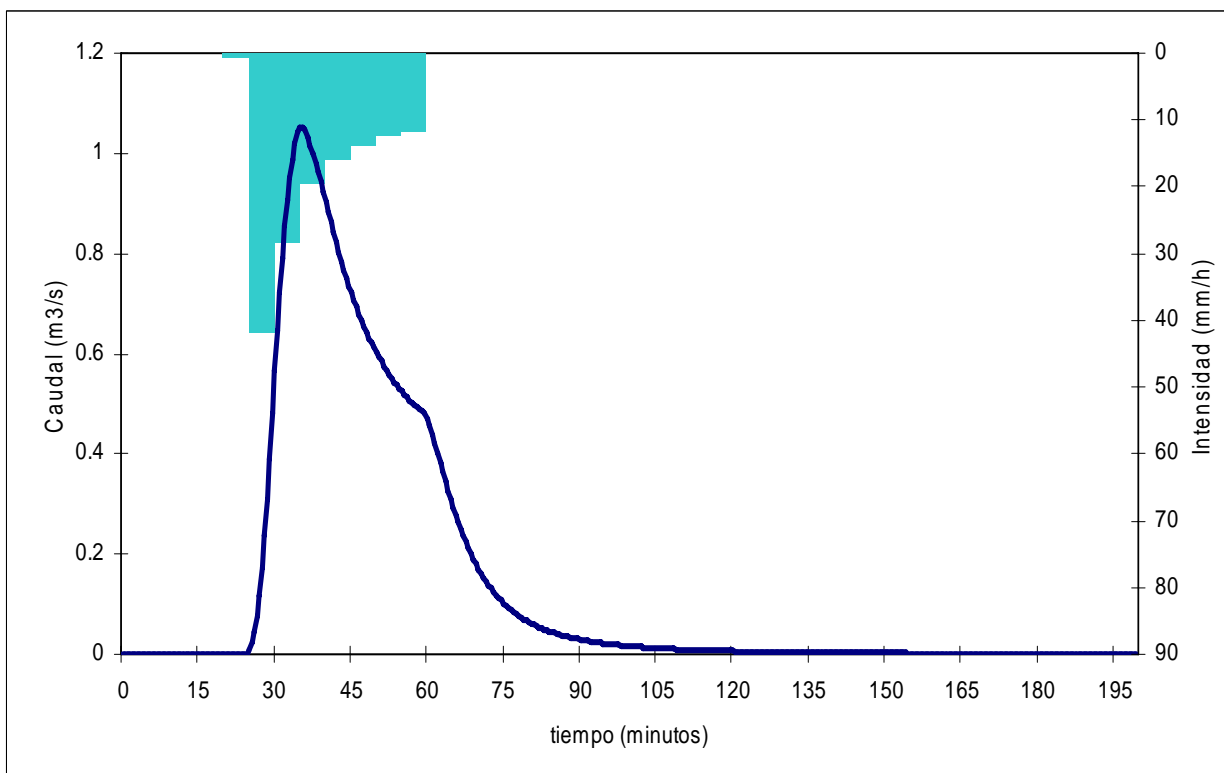
**Gráfico 18:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=2 años. Cuenca Montbau.



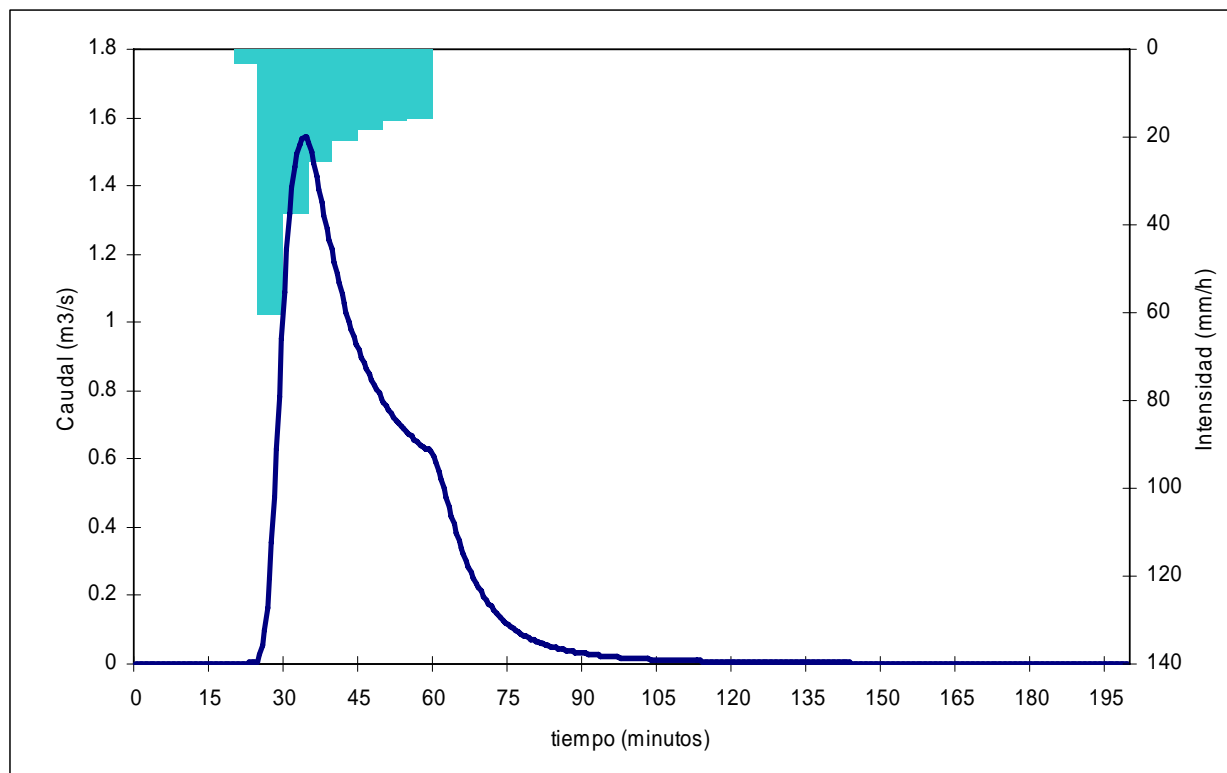
**Gráfico 19:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=5 años. Cuenca Montbau.



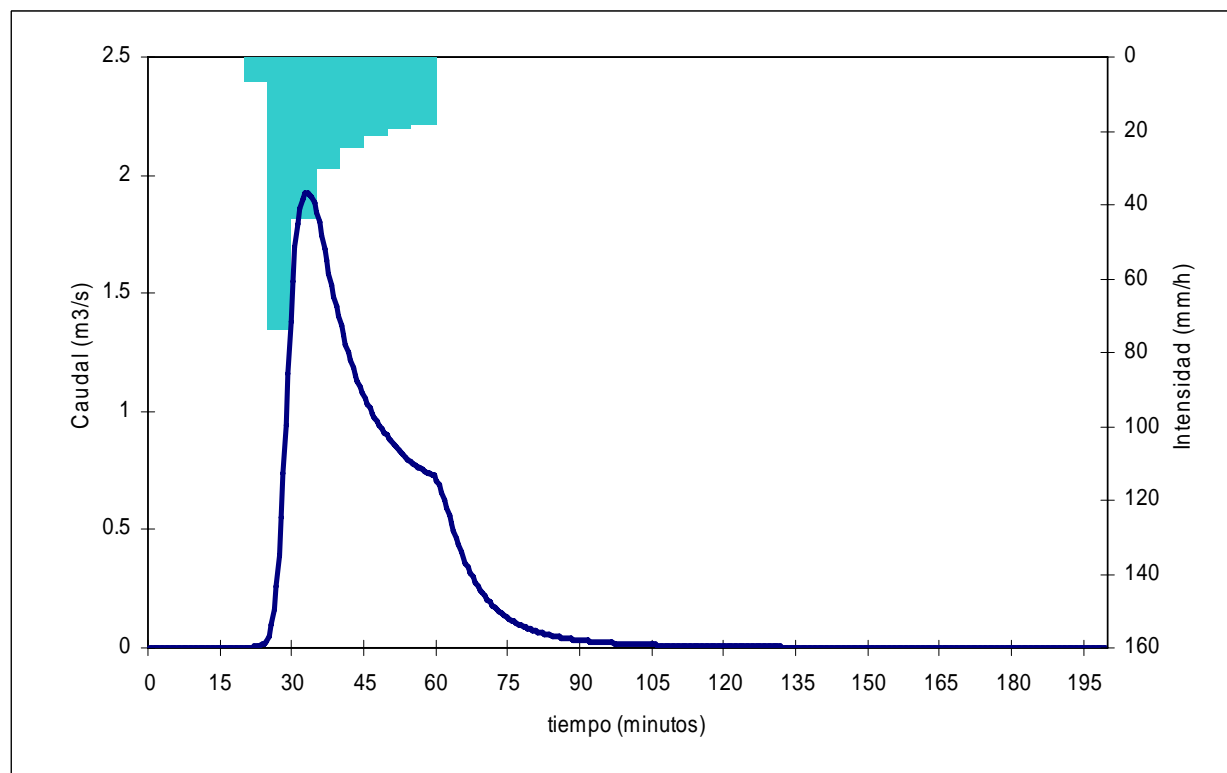
**Gráfico 20:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=10 años. Cuenca Montbau.



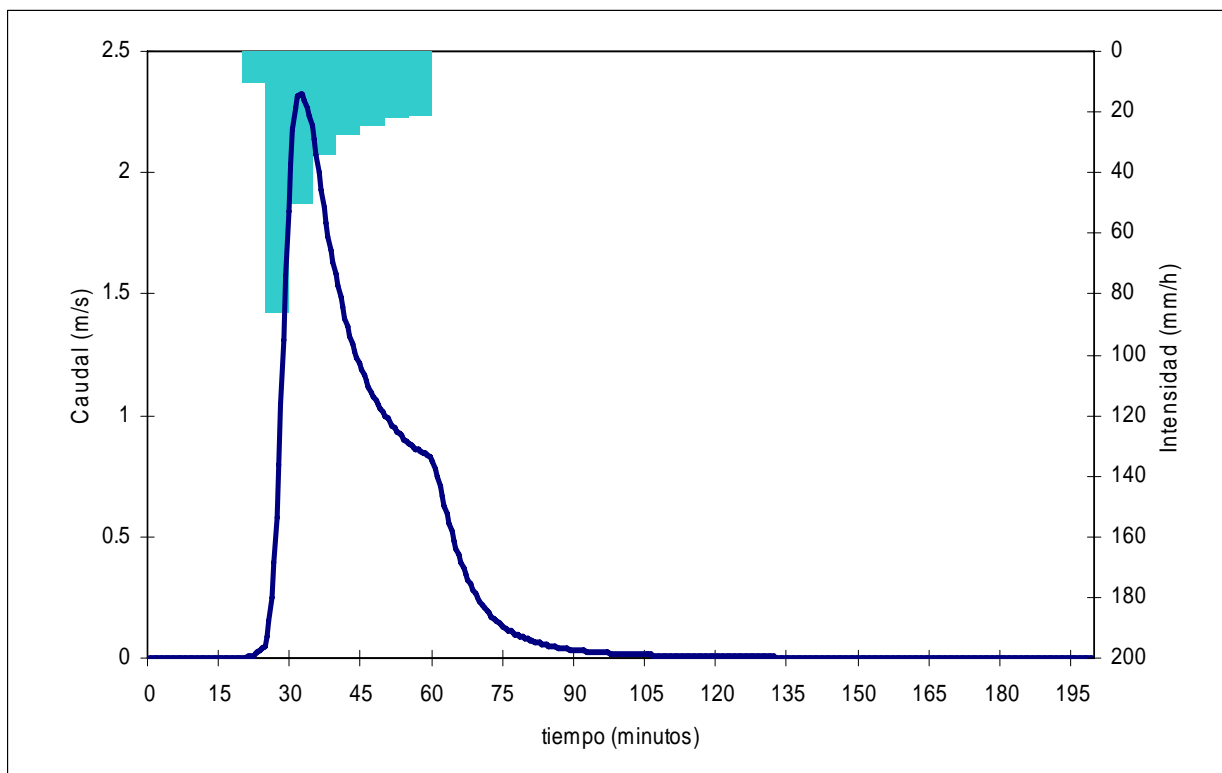
**Gráfico 21:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=20 años. Cuenca Montbau.



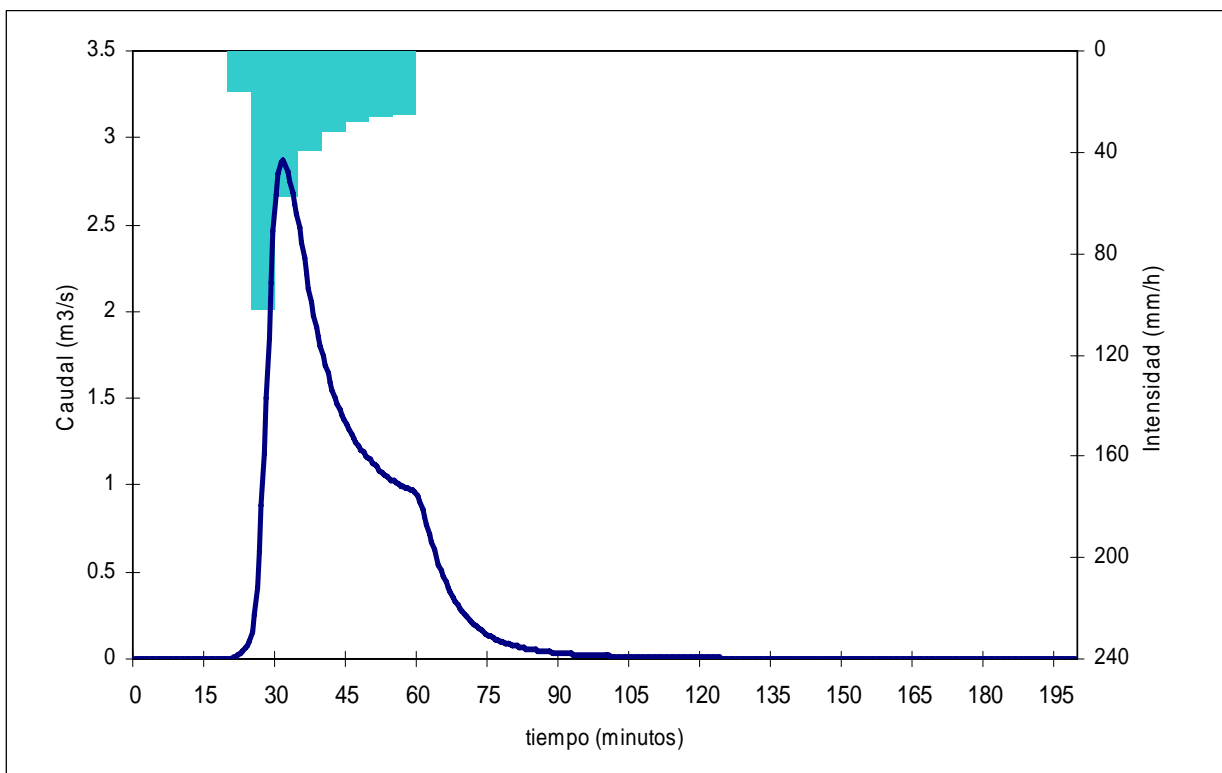
**Gráfico 22:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=50 años. Cuenca Montbau.



**Gráfico 23:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=100 años. Cuenca Montbau.



**Gráfico 24:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=200 años. Cuenca Montbau.



**Gráfico 25:** Lluvia neta sintética e hidrograma de salida de cuenca. T=500 años. Cuenca Montbau.

En la cuenca Montbau los errores del balance de masa han sido del orden del 2.5%. Los dos primeros escenarios (T2 y T5) se han calculado con un paso de tiempo de un minuto y los restantes con uno igual a medio minuto. A continuación se muestran los errores del balance de masa de agua para las dos cuencas. En todos los casos los errores se encuentran por debajo del 5% y varían entre el 3.3% y el 1.73%:

	T2	T5	T10	T20	T50	T100	T200	T500
Masdeu	2.55%	1.73%	3.42%	3.13%	2.77%	2.66%	2.54%	2.44%
Montbau	3.20%	3.30%	2.90%	2.85%	2.41%	2.17%	2.02%	1.91%

**Tabla 11:** Errores relativos del balance de masa de agua en las dos cuencas.

### 4.3 MODELO DE PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS

Una vez se han calculado los datos hidrológicos e hidráulicos de las cuencas, se procede al cálculo de la producción de sedimentos mediante la metodología descrita en el apartado 3.4. Para comprobar la bondad del resultado del cálculo erosivo se realiza un balance global de sedimentos en toda la cuenca de estudio. En segundo lugar, si se dispusiera de datos reales de caudal sólido; el valor calculado mediante el modelo se debería ajustar al valor medido en la cuenca. Como este no es el caso, el ajuste se realizará comparando el valor calculado con el valor de masa de sedimento “vertida” obtenida mediante la metodología MUSLE propuesta por Williams.

Para conocer la incertidumbre asociada al cálculo del fenómeno erosivo se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros que intervienen en dicho cálculo (parámetro de erosionabilidad, parámetro de cubierta vegetal, parámetros de calibración de las expresiones del desprendimiento y de la capacidad de transporte y ubicación de los regueros)

El balance de sedimentos se realiza para comprobar la bondad de la solución de la ecuación de continuidad de la masa de sedimento. Consiste en comparar la cantidad neta de sedimentos desprendidos (desprendimiento menos deposición) en la cuenca de estudio con la suma de los materiales “vertidos” en el punto de desagüe de la celda más los “almacenados” en el interior de la cuenca en el instante final.

La cantidad de sedimentos vertidos (transportados por el flujo en el punto de desagüe) se obtiene multiplicando el caudal sólido unitario  $[M/T.L]$  de la celda desagüe por el ancho equivalente de la misma celda  $[L]$  y por el incremento de tiempo  $[T]$ . Los valores de sedimentos desprendidos a lo largo de toda la celda se calculan mediante las expresiones de desprendimiento por acción del impacto de la lluvia y del desprendimiento por acción de la escorrentía  $[Kg/L^2.T]$ .

La masa total de sedimentos se ajusta con el valor obtenido mediante la metodología MUSLE. Esta comparación se ha realizado para las lluvias sintéticas de duración una hora y de 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años de periodo de retorno. Gracias a este análisis se pueden encontrar los valores de los parámetros de calibración  $\xi_I$ ,  $\xi_F$  y  $\xi_{tc}$  (ver apartado 2.2.2.3.2 y 3.4) que mejor determinan los valores de las tasas de desprendimiento y de la capacidad de transporte. Una vez que se han obtenido los valores de dichos parámetros se calcula la erosión producida en ambas cuencas durante un año. Este cálculo se compara con el obtenido con la aplicación de la ecuación USLE que da valores totales anuales de erosión (ver apartado 2.1.5).

Los incrementos de tiempo y de espacio utilizados en el cálculo erosivo son los mismos que se han utilizado en el cálculo hidrológico. En la cuenca Montbau se emplea un incremento de espacio de un metro y un incremento de tiempo de medio o un minuto. En la cuenca Masdeu el incremento de tiempo es igual a 5 metros y el incremento de tiempo de medio o un minuto en función del periodo de retorno de la lluvia de diseño empleada.

## 5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MODELO HIDROLÓGICO

El análisis de sensibilidad del modelo hidrológico se realiza únicamente en la cuenca de estudio Masdeu y para los periodos de retorno dos y diez años. Aunque el estudio hidrológico no es un objetivo del estudio; se ha decidido realizar este análisis de sensibilidad porque los errores en el cálculo hidrológico pueden amplificar los errores propios del cálculo erosivo. De esta manera resulta interesante saber la sensibilidad que presenta el modelo a cambios en variables como por ejemplo la tensión tangencial y que implicaciones tiene esta sensibilidad en el cálculo erosivo.

Como ya se ha comentado en el capítulo de metodología (apartado 4.2); los parámetros considerados en este análisis de sensibilidad son el coeficiente de fricción, la ubicación de los regueros y sus dimensiones geométricas. Otro parámetro del que se podría analizar la sensibilidad de la hidrología en el cálculo erosivo es el número de curva. No se ha llevado a cabo porque se considera que con los datos disponibles de usos de suelo y ortofotografía el valor de este parámetro queda definido correctamente.

En primer lugar se variará por exceso y por defecto un 20 y un 40 % los valores del coeficiente de fricción respecto a los valores considerados en el apartado 4.1 (0.035 para los regueros y 0.1 para el resto de celdas). En segundo término se variarán las dimensiones de una sección trapecial tipo. Se realizará el análisis para anchos de 0.5, 1, 2 metros y para ángulos de talud de 60, 45 y 30°. El cálculo erosivo se realiza con los coeficientes de la ecuación USLE  $K$  y  $C$  mostrados en el apartado 4.1 y con coeficientes de calibración ( $\xi_I$ ,  $\xi_F$  y  $\xi_{tc}$ ) iguales a la unidad.

### 5.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN

A continuación se exponen los resultados del análisis del coeficiente de fricción; el análisis se ha realizado considerando fija una geometría trapecial con ángulos de 60° y base de 1 metro. Los valores de referencia de fricción son 0.1 y 0.035.

	T2 años								
	Ref	más 20 %	dif %	más 40 %	dif %	menos 20 %	dif %	menos 40 %	dif %
Q punta (m3/s)	0.784	0.745	-5.0	0.690	-12.0	0.830	5.8	0.884	12.7
t punta (min)	56	59	-	60	-	53	-	49	-
τ punta (KPa)	0.408	0.429	5.2	0.442	8.4	0.382	-6.2	0.351	-14.0
qs punta (kg/s.m)	17.1	17.0	-0.7	16.5	-3.7	17.4	1.4	17.8	4.1
t punta (min)	56	59	-	60	-	53	-	49	-
Sólido vertido (Kg)	38655	40549	4.9	42272	9.4	36600	-5.3	34397	-11.0
Erosión (kg)	317621	359642	13.2	398970	25.6	272385	-14.2	223147	-29.7
Deposición (Kg)	278500	320050	14.9	353080	26.8	236200	-15.2	189560	-31.9
	T10 años								
Q punta (m3/s)	3.386	3.186	-5.9	3.028	-10.6	3.614	6.7	3.930	16.0
t punta (min)	39.5	41.5	-	43.5	-	37.5	-	35	-
τ punta (KPa)	0.716	0.751	4.8	0.781	9.0	0.674	-5.9	0.623	-13.0
qs punta (kg/s.m)	108.8	97.0	-10.9	88.7	-18.5	124.7	14.6	146.4	34.5
t punta (min)	39.5	41.5	-	43.5	-	37.5	-	35	-
Sólido vertido (Kg)	194623	192715	-1.0	192257	-1.2	198687	2.1	205588	5.6
Erosión (kg)	662370	749300	13.1	840410	26.9	555032	-16.2	449646	-32.1
Deposición (Kg)	484120	572280	18.2	659690	36.3	370550	-23.5	252890	-47.8

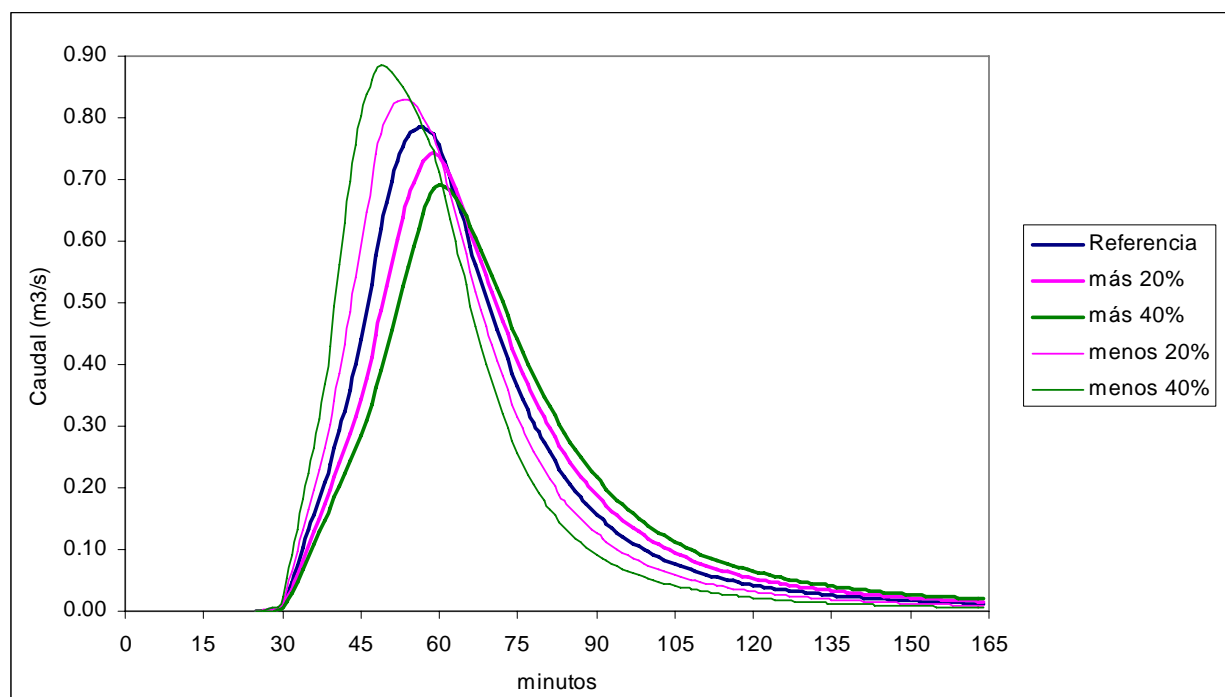
**Tabla 12:** Caudal punta, tiempo a la punta, tensión pico, caudal sólido punta, tiempo a la punta de sólido, sólido vertido<sup>5</sup>, del desprendimiento y de la deposición en el interior de la cuenca en función del valor del coeficiente de fricción. Cuenca Masdeu.

<sup>5</sup> Se entiende por sólido vertido a la cantidad de material que transporta el flujo en el punto de desagüe durante todo el tiempo de análisis. Es decir, la cantidad de material que sale de la cuenca acarreado o suspendido por el flujo.

Los resultados reflejan un comportamiento lógico de los parámetros hidráulicos al variar el valor de la fricción: si se aumenta la fricción disminuye el caudal punta y aumentan el tiempo al pico y la tensión tangencial máxima. Se puede comprobar en la Tabla 12 que las variaciones (en valor relativo) de la tensión tangencial y del caudal punta son muy parecidas para los dos periodos de retorno analizados.

Para el caudal punta se tiene una variación máxima del 16%, el tiempo de pico varía como máximo siete minutos y la tensión tangencial máxima disminuye un 14% al disminuir la fricción un 40%.

Las variables erosivas más sensibles a la variación de la fricción son la erosión y la deposición. Si se aumenta un 20% la fricción; la erosión y la deposición aumentan aproximadamente un 15%. Para aumentos del 40%, las dos variables aumentan aproximadamente un 30%. Si se disminuye la fricción los resultados varían los mismos órdenes de magnitud pero de forma inversa. La variable que menos se ve afectada por la variación del coeficiente de fricción es la cantidad de sólido vertido por la cuenca. La mayor variación es un decremento del 11% cuando se desciende un 40% la fricción (para T2). En T10 años prácticamente no varía la cantidad de sólido vertido. Esto puede ser debido a que la lluvia T10 provoca mucha erosión de sólido que ayuda a alcanzar la capacidad de carga del flujo, mientras que en T2 no se llega a este estado.



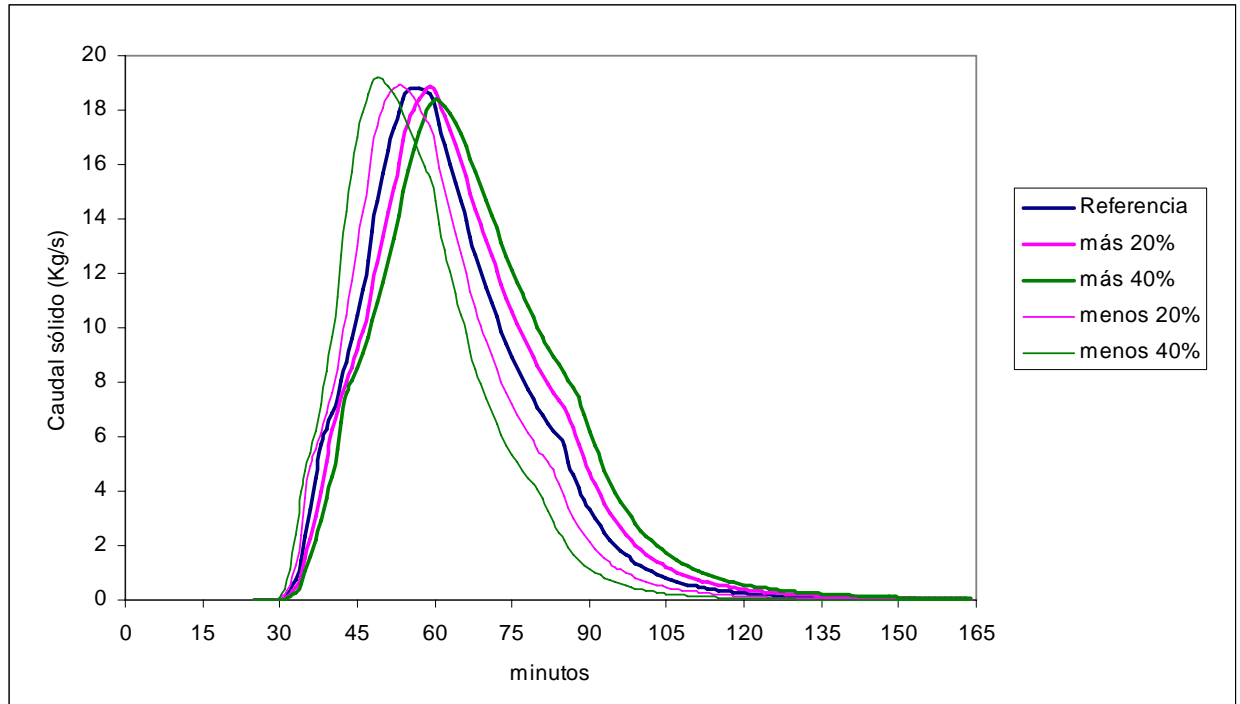
**Gráfico 26:** Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años. Cuenca Masdeu.

En el Gráfico 26 se puede observar claramente la variación en la forma del hidrograma en función de la fricción considerada. Un incremento del valor de la fricción produce un retardo en la llegada del caudal pico, además tanto la rama de concentración como la de descarga tienden a ser más tendidas; mientras que un descenso en el valor de la fricción produce un adelanto en la llegada del caudal pico y que las ramas del hidrograma tiendan a ser más verticales. Este comportamiento se produce de manera idéntica en los sedigramas que se muestran en el Gráfico 27.

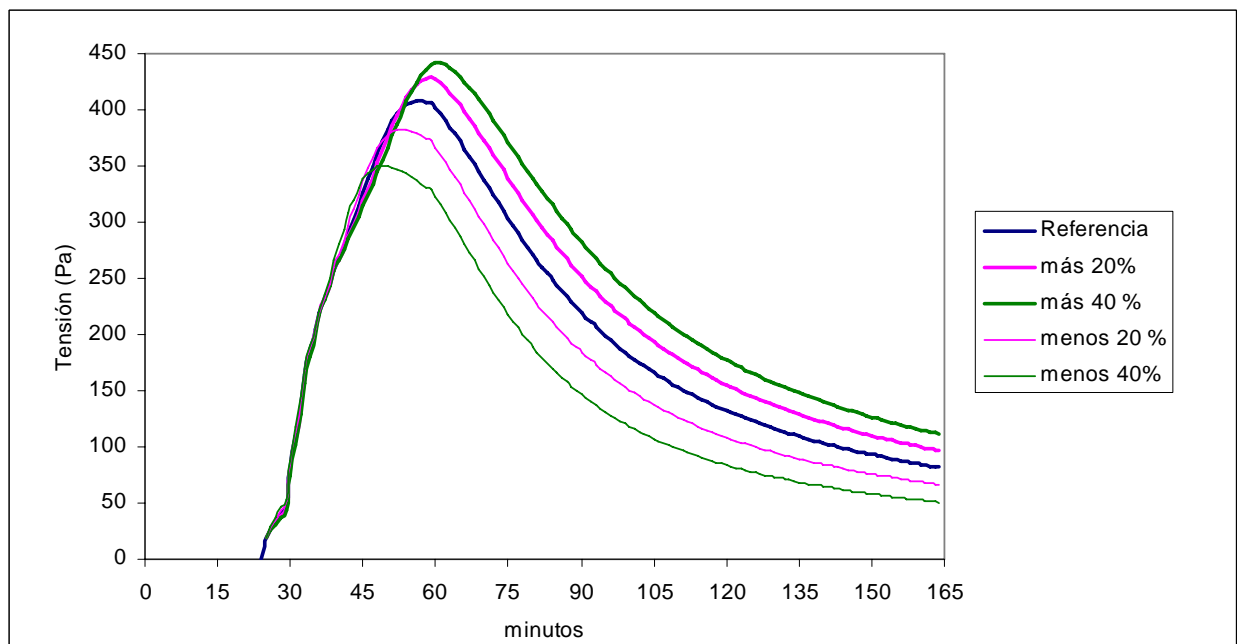
Para el periodo de retorno igual a diez años los hidrogramas presentan el mismo comportamiento que el explicado para dos años de periodo de retorno. La principal diferencia (a parte de la forma del hidrograma que se encuentra controlada por la forma del hietograma y de los valores de caudal que lógicamente son mayores) es el adelanto del tiempo de pico en comparación con los hidrogramas correspondientes al periodo de retorno de 2 años. Este efecto se debe al mayor volumen de agua que provoca mayores calados y mayores radios hidráulicos; provocando a su vez un aumento de la velocidad.



Como se ha comentado en el apartado de metodología se ha realizado un balance de continuidad de la masa de agua comparando, para cada uno de los hidrogramas de salida, el volumen de agua *saliente* de la cuenca con la precipitación neta total. Para los hidrogramas que se muestran en el Gráfico 26 el error máximo en el volumen de salida ha sido de 2.7% en la modelización con un decremento del 40% del valor de la fricción. El error mínimo se ha producido en la modelización con un incremento del 40% del valor de la fricción y ha sido de 0.85%. Para el periodo de retorno de diez años se obtienen errores alrededor del 3.3% sobre el volumen de lluvia neta.



**Gráfico 27:** Sedigramas de salida cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años. Cuenca Masdeu.



**Gráfico 28:** Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes coeficientes de fricción T2 años.

La fricción es la oposición del terreno al movimiento del flujo. Si se tiene mucha fricción, el flujo recibirá del terreno mucha fuerza para dificultar su avance; pero al mismo tiempo, como reacción; el flujo realizará un mayor esfuerzo tangencial sobre el terreno. Este comportamiento se puede apreciar en el Gráfico 28; se ve con claridad en la rama de descarga que a mayor fricción se tiene mayor tensión tangencial media.

## 5.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA GEOMETRÍA DE LOS REGUEROS

A continuación se presentan los resultados del análisis de sensibilidad al variar los parámetros de geometría de los regueros. En primer lugar se han variado los anchos de los regueros manteniendo fijos los ángulos del talud ( $60^\circ$ ), los coeficientes de fricción considerados como fijos son los mismos que en el análisis anterior: 0.1 y 0.035. El ancho de reguero considerado como referencia es de un metro.

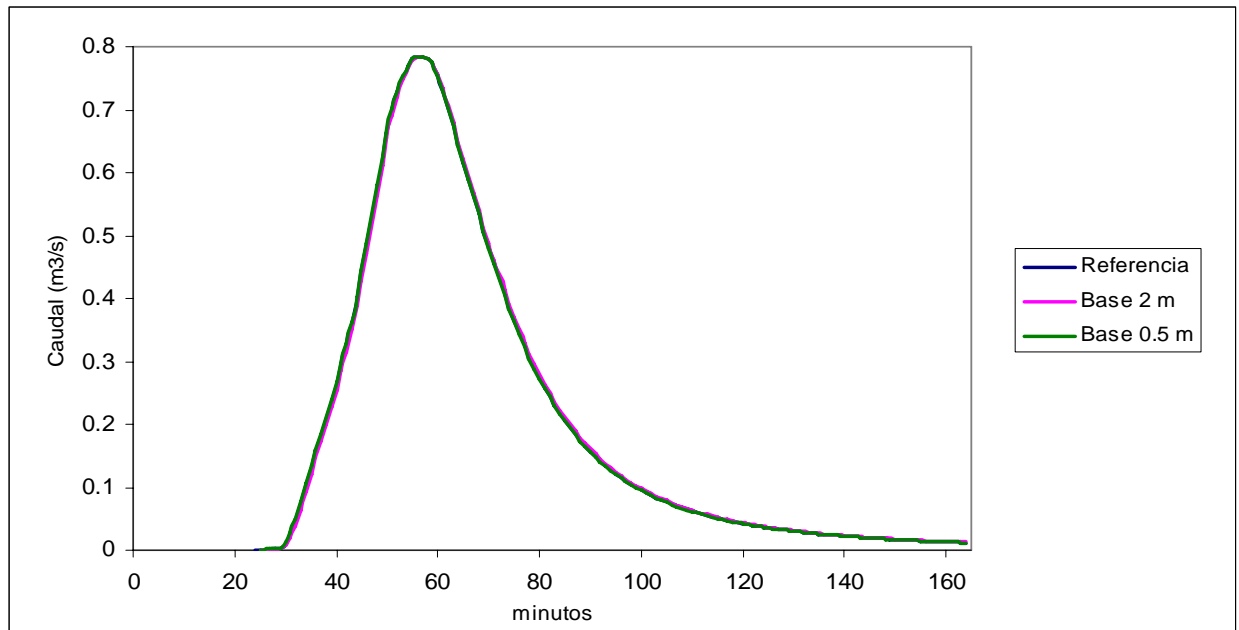
	T2 años				
	Referencia	2 m	dif %	0.5 m	dif %
Q punta (m <sup>3</sup> /s)	0.784	0.784	0.0	0.785	0.0
t punta (min)	56	57	-	56	-
$\tau$ punta (KPa)	0.408	0.351	-14.0	0.429	5.2
qs punta (kg/s.m)	17.1	16.8	-1.9	25.1	46.2
t punta (min)	56	56	-	56	-
Sólido vertido (Kg)	38655	53979	39.6	31515	-18.5
Erosión (kg)	317621	969291	205.2	161251	-49.2
Deposición (Kg)	278500	913430	228.0	134000	-51.9
	T10 años				
Q punta (m <sup>3</sup> /s)	3.386	3.383	-0.1	3.387	0.0
t punta (min)	39.5	39.5	-	39.5	-
$\tau$ punta (KPa)	0.716	0.645	-10.0	0.737	2.8
qs punta (kg/s.m)	108.8	63.6	-41.5	161.8	48.7
t punta (min)	40	40	-	40	-
Sólido vertido (Kg)	194623	225911	16.1	198861	2.2
Erosión (kg)	662220	1685410	154.5	389850	-41.1
Deposición (Kg)	484120	1458200	201.2	212420	-56.1

**Tabla 13:** Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función del ancho del reguero en el punto de desagüe.

De los resultados expuestos en la Tabla 13 se observa que tanto el tiempo al pico como el caudal pico prácticamente no dependen del ancho de la base del reguero; en cambio la tensión tangencial sí. Como se puede comprobar las variaciones en la tensión para los dos periodos de retorno son del mismo orden de magnitud aunque ligeramente mayores para T=2 años de retorno.

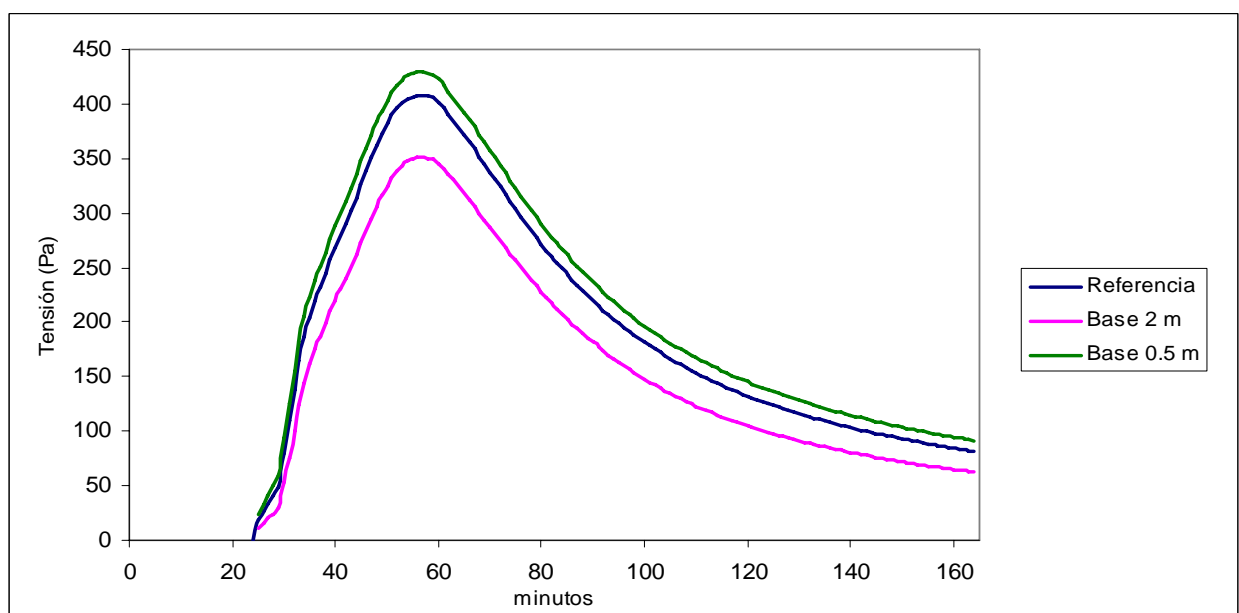
Las variables erosivas son mucho más sensibles que las hidráulicas a la variación del ancho de los regueros. Las mayores diferencias se tienen al incrementar un metro el ancho del reguero. La erosión aumenta un 200% y la deposición un 230% para T2. El aumento de la erosión viene determinado por la variación de las tensiones de corte (al variar el ancho de la sección y a su vez el radio hidráulico) y por la variación propia del ancho equivalente del reguero. Como el desprendimiento se calcula como una cantidad de masa por unidad de área y unidad de tiempo; si se considera mayor ancho se está aumentando la cantidad de material desprendido. Un aumento de la erosión comporta también un aumento de la deposición, ya que la capacidad de carga es la misma para los tres casos (se tiene el mismo caudal).

La cantidad de sólido vertido por la cuenca es menos sensible que el desprendimiento a la variación del ancho de los regueros. Esta variable se incrementa para regueros más anchos (40% para T2, 15% para T10) y se hace menor para más estrechos (-20% para T2).



**Gráfico 29:** Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años.

Los hidrogramas de salida de la cuenca para los dos periodos de retorno vienen a corroborar que el valor del caudal no depende del ancho del reguero considerado. Los errores en el volumen de salida de la cuenca respecto al volumen de precipitación neta son de aproximadamente 2.5% para T=2 años y 2.4% para T=10 años. La tensión tangencial sí que es sensible a la variación del ancho de base de los regueros (Gráfico 30), ya que el ancho de los regueros determina el valor del radio hidráulico. La tensión tangencial es directamente proporcional al radio hidráulico. Como ya se ha comentado en el apartado 3.3, el modelo hidráulico calcula el perímetro hidráulico como una función del área mojada mediante un ajuste potencial; así pues, el radio hidráulico también es función del área mojada. Para T=10 años de periodo de retorno se obtiene el mismo comportamiento cualitativo que el mostrado en el Gráfico 30.



**Gráfico 30:** Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años.

Seguidamente se muestran los resultados de sensibilidad a la variación del ángulo del talud de los regueros. Se han considerado tres ángulos: 60° (valor de referencia), 45° y 30°. Los parámetros considerados como fijos han sido un ancho de base de 1 metro y coeficientes de fricción iguales a 0.1 para celdas con flujo hortoniano y 0.035 para celdas con flujo canalizado.

	T2 años				
	Referencia	45°	dif %	30°	dif %
Q punta (m3/s)	0.784	0.784	0.0	0.784	0.0
t punta (min)	56	56	-	56	-
$\tau$ punta (KPa)	0.408	0.393	-3.6	0.365	-10.6
qs punta (kg/s.m)	17.1	16.9	-1.7	25.1	46.2
t punta (min)	56	56	-	56	-
Sólido vertido (Kg)	38655	40930	5.9	46821	21.1
Erosión (kg)	317621	362791	14.2	445111	40.1
Deposición (Kg)	278500	322700	15.9	400770	43.9
	T10 años				
	Referencia	45°	dif %	30°	dif %
Q punta (m3/s)	3.386	3.386	0.0	3.386	0.0
t punta (min)	39.5	39.5	-	39.5	-
$\tau$ punta (KPa)	0.716	0.698	-2.6	0.646	-9.9
qs punta (kg/s.m)	108.8	87.6	-19.5	72.1	-33.7
t punta (min)	56	56	-	60	-
Sólido vertido (Kg)	194623	183764	-5.6	187624	-3.6
Erosión (kg)	662220	746480	12.7	944800	42.7
Deposición (Kg)	484120	597980	23.5	817000	68.8

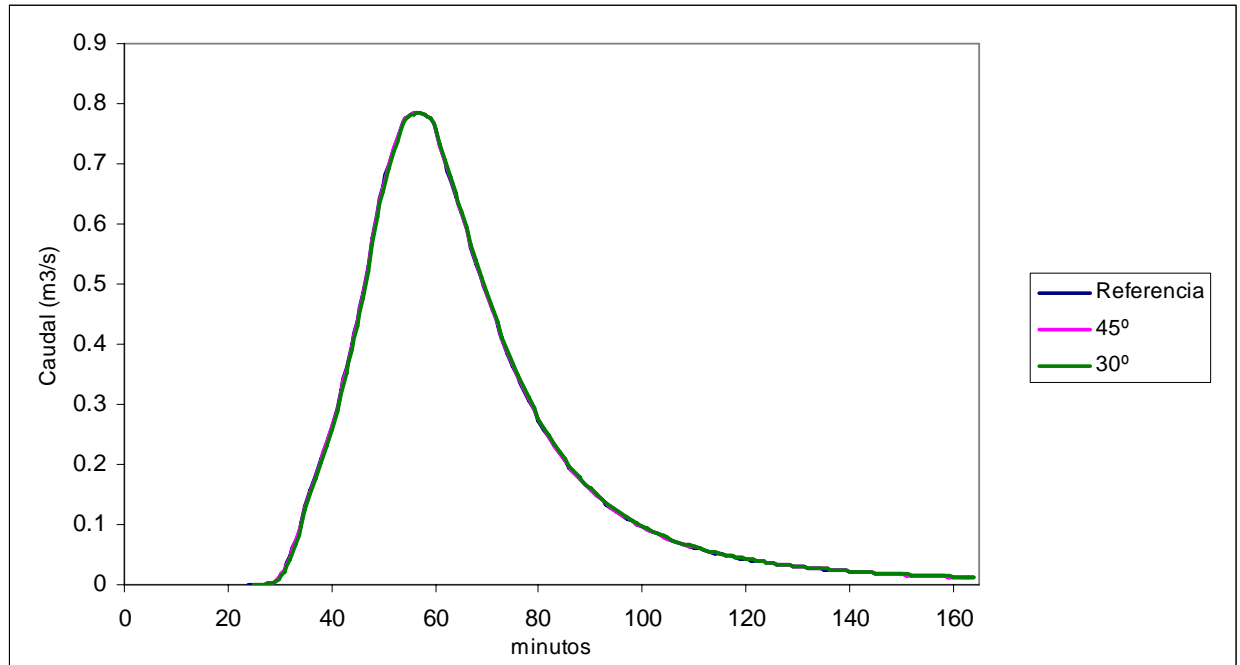
**Tabla 14:** Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función del ángulo el talud del reguero en el punto de desagüe.

Las diferencias relativas en los dos periodos de retorno analizados son prácticamente las mismas. El valor de caudal punta permanece inalterado. Una vez más el parámetro más sensible es la tensión tangencial; para el ángulo de 30° se da un descenso del 10% sobre el valor de referencia. Como en el análisis anterior de variación de anchos de los regueros, la geometría define el valor del radio hidráulico y de éste depende el valor de la tensión tangencial.

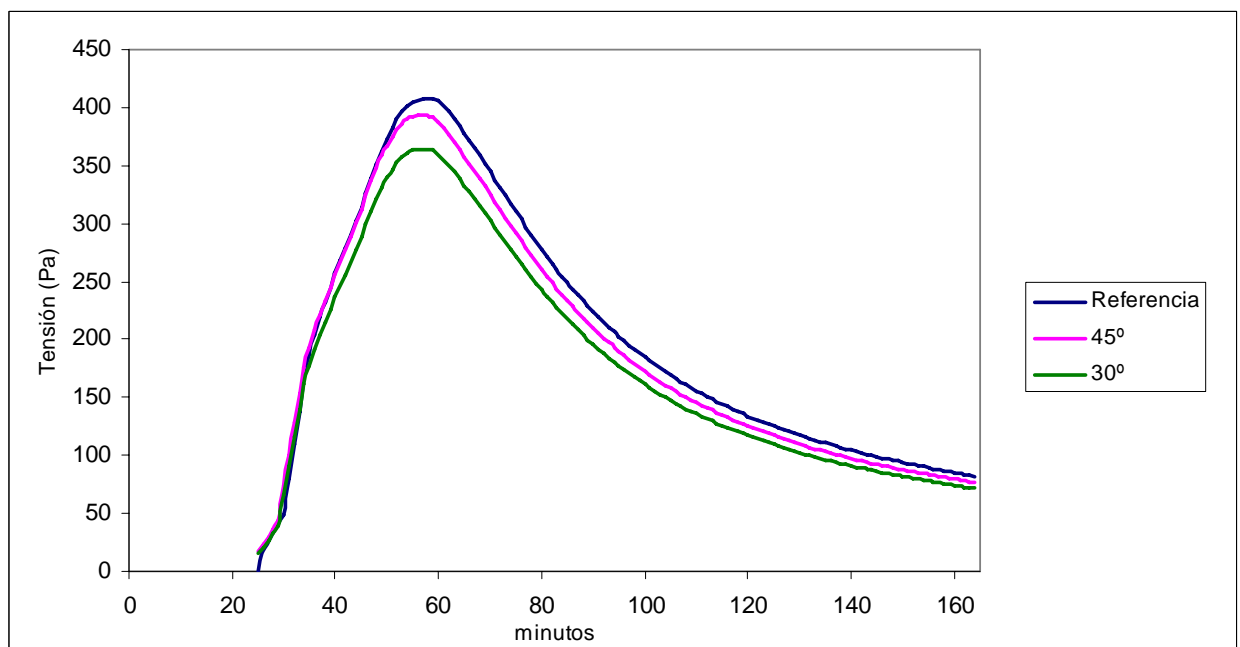
Las variables erosivas son más sensibles a la variación del ángulo del talud que las hidrológicas, aunque esta sensibilidad es menor que en el análisis del ancho de los regueros. Parece que la cantidad de sólido desprendido es mayor cuanto menor sea el ángulo del talud (es decir, cuanto más plano sea el reguero); ya que el ancho que transforma el caudal sólido unitario en caudal sólido es mayor; y por lo tanto también es mayor el área donde actúa el desprendimiento. El desprendimiento aumenta aproximadamente un 15% para un ángulo de 45° y un 40% para un ángulo de 30°.

Cuando aumenta el desprendimiento aumenta a su vez la deposición; como se puede ver en la tabla 13 este aumento es mayor para T10 que para T2. La cantidad de sólido vertido es muy poco sensible a la variación del ángulo del talud, sobretodo para T10. Estos dos hechos hacen pensar que el flujo generado por la lluvia T10 alcanza en más medida la capacidad de carga mientras que la lluvia de T2 no lo consigue durante tanto tiempo.

En los gráficos que se muestran a continuación se ven los hidrogramas de salida de cuenca y la tensión tangencial en la celda de desagüe para T=2 años. Los errores en el balance entradas – salidas de agua han sido de aproximadamente 2.5% para T=2 años y de 3.4% para T=10 años.



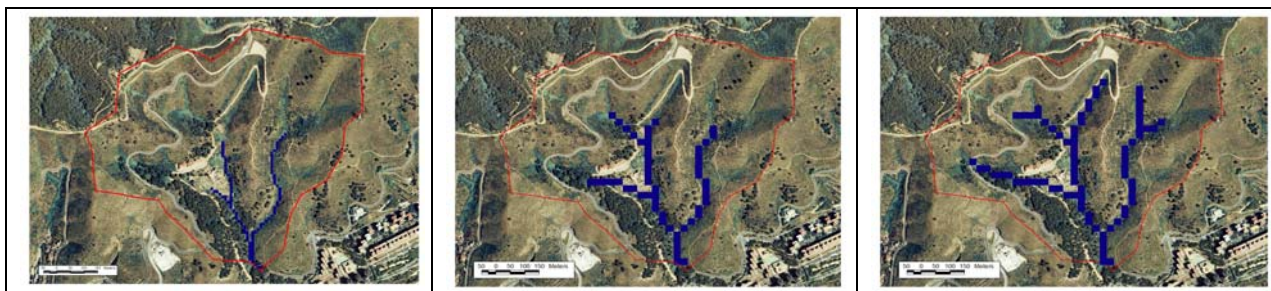
**Gráfico 31:** Hidrogramas de salida cuenca aplicando diferentes ángulos de talud de regueros T2 años.



**Gráfico 32:** Valores de tensión tangencial en salida de cuenca aplicando diferentes anchos de regueros T2 años.

### 5.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RED DE REGUEROS

Una vez analizado el efecto que produce la variación del coeficiente de fricción o de la geometría de los regueros solamente queda por analizar el efecto de considerar más o menos zonas de la cuenca de estudio consideradas como regueros; es decir, analizar los efectos de una variación de la red de regueros considerada. Para llevar a cabo este análisis se realizará el cálculo hidrológico para  $T=2$  años en la cuenca Masdeu; con las redes que se muestran en el Gráfico 33. Cabe mencionar que todos los análisis realizados hasta el momento se han llevado cabo con la red de regueros A.



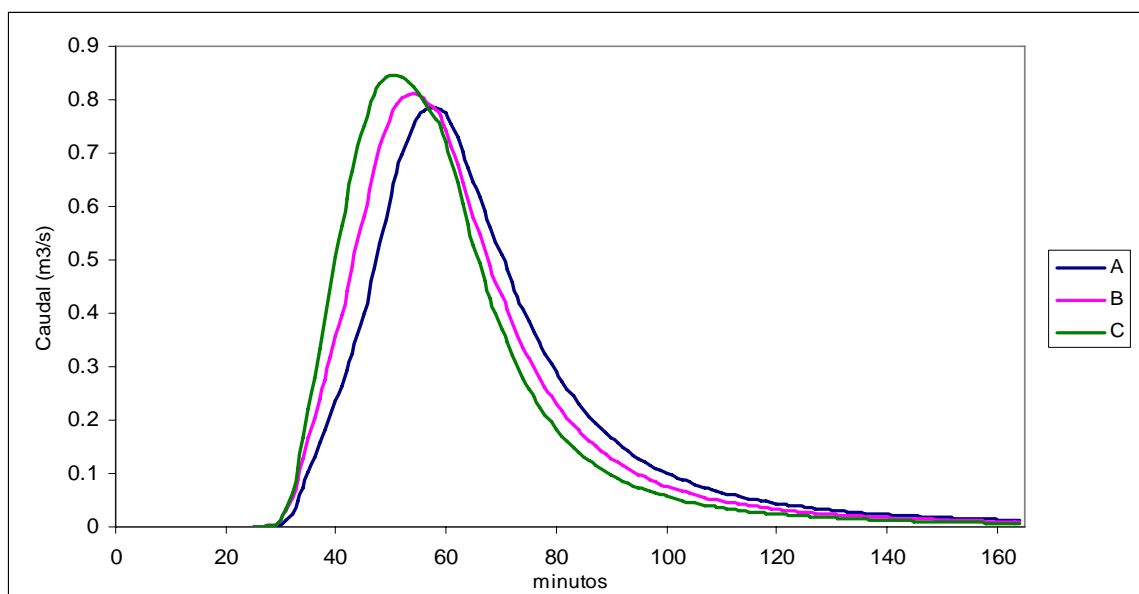
**Gráfico 33:** Redes de regueros A, B y C (de izquierda a derecha).

Como se ve en el gráfico las tres redes van de una poco desarrollada (red A) a una red muy desarrollada (red C), pasando por una intermedia (red B). A continuación se muestran los resultados del análisis. Se han considerado como valores fijos un coeficiente de fricción de 0.1 y 0.035, secciones de los regueros con ancho igual a un metro y ángulo de  $60^\circ$ .

	A	B	dif %	C	dif %
Q punta (m <sup>3</sup> /s)	0.784	0.813	3.6	0.846	7.9
t punta (min)	56	42	-	39	-
t punta (KPa)	0.408	0.413	1.4	0.420	3.0

**Tabla 15:** Variación del caudal punta, del tiempo al pico y de la tensión pico en función de la red de regueros.

Como se puede comprobar en el Gráfico 34, el hecho de realizar el cálculo hidrológico en una red de regueros mas desarrollada tiene un efecto similar al de disminuir la fricción. Esto se debe a que si se consideran más celdas que son regueros, lo que implícitamente se está considerando es un mayor número de celdas con fricciones más pequeñas.



**Gráfico 34:** Hidrogramas de salida de cuenca aplicando diferentes redes de regueros T2 años.

Aunque las tensiones tangenciales en el punto de desagüe sean prácticamente idénticas, esto no sucede en todo el dominio de la cuenca de estudio. La tensión tangencial en las celdas con flujo canalizado es mayor que en las celdas con flujo hortoniano. Entonces una celda que en la red de regueros A tiene comportamiento hortoniano puede darse el caso de que en las redes B o C tenga flujo canalizado y por lo tanto tensiones tangenciales mayores. Este hecho tiene mucha implicación en el cálculo del proceso erosivo ya que la erosión por flujo es directamente proporcional a la tensión tangencial.

Los cambios producidos por variaciones de la red de regueros en los valores de las variables erosivas se muestran en el apartado siguiente (análisis de sensibilidad del modelo erosivo). Como es normal en la red más densa (red C) se produce mas erosión y mas deposición que en las otras dos; pero la diferencia en la cantidad de sólido vertido es de tan solo un 3.5% más que en la red menos densa.





## 6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARÁMETROS MODELO EROSIVO

Como en el modelo hidrológico, en el cálculo de la erosión hídrica también se ha realizado un análisis de sensibilidad de los parámetros involucrados; esta vez el análisis de sensibilidad de parámetros se realiza en las dos cuencas objeto de estudio. Dichos parámetros son el coeficiente de erosionabilidad  $K$ , el coeficiente de cubierta vegetal  $C$  y los parámetros de calibración correspondientes a las expresiones de desprendimiento por impacto, por flujo y de capacidad de transporte. También se ha comprobado la influencia en el resultado del cálculo erosivo que tiene la red de regueros considerada. Ese análisis se ha desarrollado para  $T=2$  años y  $T=10$  años.

Los parámetros hidrológicos considerados han sido 0.1 y 0.035 como valores de fricción y regueros con un metro de ancho de base y  $60^\circ$  de ángulo. En este documento únicamente se muestra el análisis de sensibilidad realizado en la cuenca Masdeu. El análisis en la cuenca Montbau se puede consultar en el anejo 4. Las hidrologías utilizadas en este análisis de sensibilidad han sido las mismas que han generado los hidrogramas mostrados en el apartado 4.2.

### 6.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE EROSIONABILIDAD $K$

En primer lugar se comprueba el efecto que produce la variación del coeficiente de erosionabilidad. Concretamente se ha desarrollado el cálculo erosivo con los siguientes valores de  $K$ : 0.058; 0.07 y 0.046. El resto de parámetros se han considerado fijos. Para el coeficiente de cubierta vegetal se han tomado los valores mostrados en la Tabla 5; los parámetros de calibración escogidos han sido iguales a la unidad para las tres expresiones (desprendimiento por flujo, por salpicadura y capacidad de transporte). Se ha considerado una red de regueros como la A mostrada en el Gráfico 33. Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
$K$	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
0.058	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
0.07	43418	42653	11.1	340680	88.9	383333	339030	58	827	1.9
0.046	33650	28029	11.1	223870	88.9	251899	218180	57	12	0.0

**Tabla 16:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición y sólido almacenado en el instante final en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno  $T=2$  años en función del parámetro  $K$ . Cuenca Masdeu.

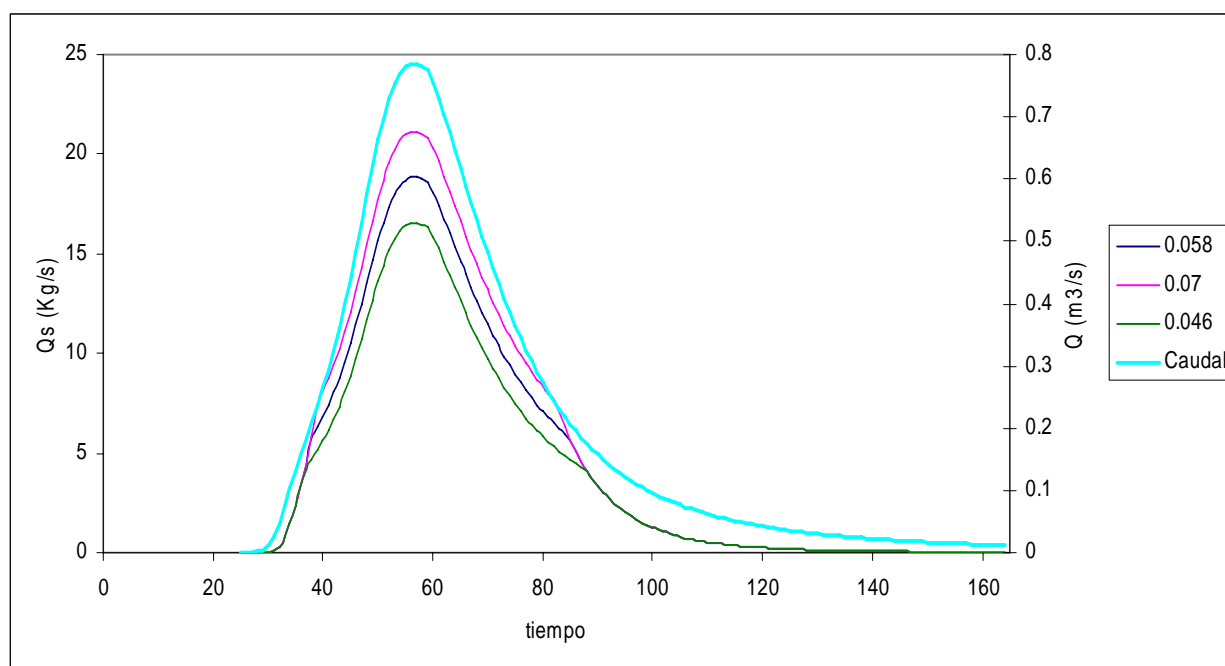
Valor $K$	0.058	0.07	dif %	0.046	dif %
qs punta (kg/s.m)	17.1	19.2	12.2	15.1	-12.2
t punta (min)	57	57	-	57	-
Sólido vertido (Kg)	38655	43418	12.3	33650	-12.9
Erosión (kg)	317621	383333	20.7	251899	-20.7
Deposición (Kg)	278500	339030	21.7	218180	-21.7

**Tabla 17:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro  $K$  para el periodo de retorno  $T=2$  años. Cuenca Masdeu.

De las tablas mostradas arriba se puede apreciar como las variaciones de los parámetros hidráulicos responden de manera muy lineal a los cambios en el valor del parámetro de erosionabilidad. Como es lógico; ya que la erosionabilidad es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, para mayores erosionabilidades del terreno se producen mayores desprendimientos de material y mayor cantidad de sólido vertido por la cuenca al exterior.

Incrementos del orden del 20% en el parámetro de erosionabilidad del suelo producen incrementos del mismo orden en el desprendimiento y en la deposición, e incrementos del orden del 10% en el valor del sólido vertido por el punto de desagüe de la cuenca. El comportamiento de las variables erosivas cuando se descende un 20% el valor del parámetro  $K$  es el inverso.

Al ser las condiciones hidrológicas idénticas, en los tres casos se tiene la misma capacidad de transporte. De este modo si se produce mayor desprendimiento, generalmente se producirá también mayor deposición. Este comportamiento se puede observar en las tablas mostradas arriba; a mayor erosionabilidad mayor deposición. También es consecuencia de la igualdad de condiciones hidráulicas que la proporción de sedimentos desprendidos en las celdas hortonianas o canalizadas sea la misma en los tres casos (88.9% de desprendimiento en celdas canalizadas y 11.1% en celdas hortonianas).



**Gráfico 35:** Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para  $T=2$  años.

Como se puede comprobar en el Gráfico 35 la punta de caudal sólido se da en el mismo instante que la punta de caudal líquido. Cabe destacar que durante la fase inicial de subida y la final de descenso los tres sedigramas se superponen; este hecho se debe a que en los momentos iniciales y finales se tiene poco caudal y por lo tanto poca capacidad de carga en el flujo; como los valores de desprendimiento son muy elevados (parámetro de calibración del desprendimiento por flujo igual a la unidad) la capacidad de carga se supera y la salida de material por el desagüe de la cuenca es independiente del valor de erosionabilidad considerado; dependiendo solamente de la hidráulica. Una vez que el caudal y la capacidad de carga aumentan, la salida de material si que depende del valor del parámetro  $K$ .

Para el periodo de retorno de diez años se han obtenido los siguientes resultados:

$K$	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
0.058	194632	107460	16.2	554910	83.8	662370	484120	12.5	-16394	-8.4
0.07	207045	129690	16.2	669720	83.8	799410	611470	12.67	-19117	-9.2
0.046	147217	85225	16.2	440100	83.8	525325	355780	12	22316	15.2

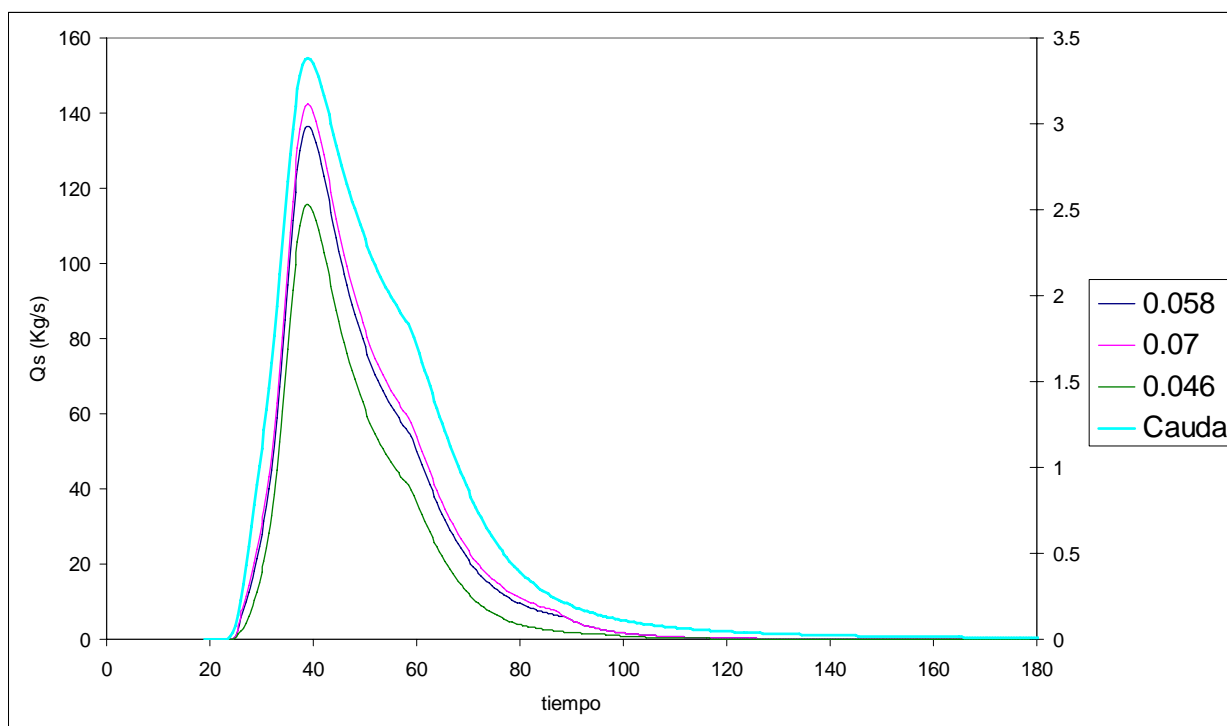
**Tabla 18:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición, sólido almacenado en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno  $T=10$  años en función de  $K$ . Cuenca Masdeu.

Valor $K$	0.058	0.07	dif %	0.046	dif %
qs punta (kg/s.m)	108.8	113.4	4.2	92.2	-15.3
t punta (min)	39	39	-	39	-
Sólido vertido (Kg)	194632	207045	6.4	147217	-24.4
Erosión (kg)	662370	799410	20.7	525325	-20.7
Deposición (Kg)	484120	611470	26.3	355780	-26.5

**Tabla 19:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro  $K$  para el periodo de retorno  $T=10$  años. Cuenca Masdeu.

Como diferencia principal respecto al periodo de retorno de dos años en este caso se tiene un porcentaje ligeramente mayor de desprendimiento en las celdas con comportamiento hortoniano del flujo (ya que se presentan mayores caudales). Además la respuesta a las variaciones de  $K$  no es tan lineal como con la lluvia T2.

Las diferencias relativas en la erosión y deposición son prácticamente las mismas que en el caso anterior. El caudal sólido punta y la cantidad de sólido vertido presentan comportamientos ligeramente diferentes. Estas dos variables presentan más sensibilidad al descenso de erosionabilidad que al aumento.



**Gráfico 36:** Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para  $T=10$  años.

En la Tabla 19 y en el Gráfico 36 se puede ver que la diferencia presente entre el caso de  $K=0.058$  y  $K=0.07$  es muy pequeña. Puede deberse a que al presentar en ambos casos altas tasas de desprendimiento, se alcance la capacidad de carga del flujo y la salida de material de la cuenca quede controlada principalmente por la hidrología.

## 6.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL COEFICIENTE DE CUBIERTA C

El siguiente análisis se realiza para comprobar los efectos de la variación del valor del parámetro de cubierta vegetal  $C$ . Se incrementarán y disminuirán un 20% los valores de la Tabla 5. Como coeficiente de erosionabilidad se ha considerado un valor igual a 0.058. Los parámetros de calibración considerados han sido iguales a la unidad para las tres expresiones (desprendimiento por flujo, por salpicadura y capacidad de transporte). Se ha considerado una red de regueros como la A mostrada en el Gráfico 33. Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
$C$	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
referencia	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
más 20%	46386	42409	11.1	338730	88.9	381139	334200	69	484	1.0
menos 20%	30924	28273	11.1	225820	88.9	254093	222800	46	323	1.0

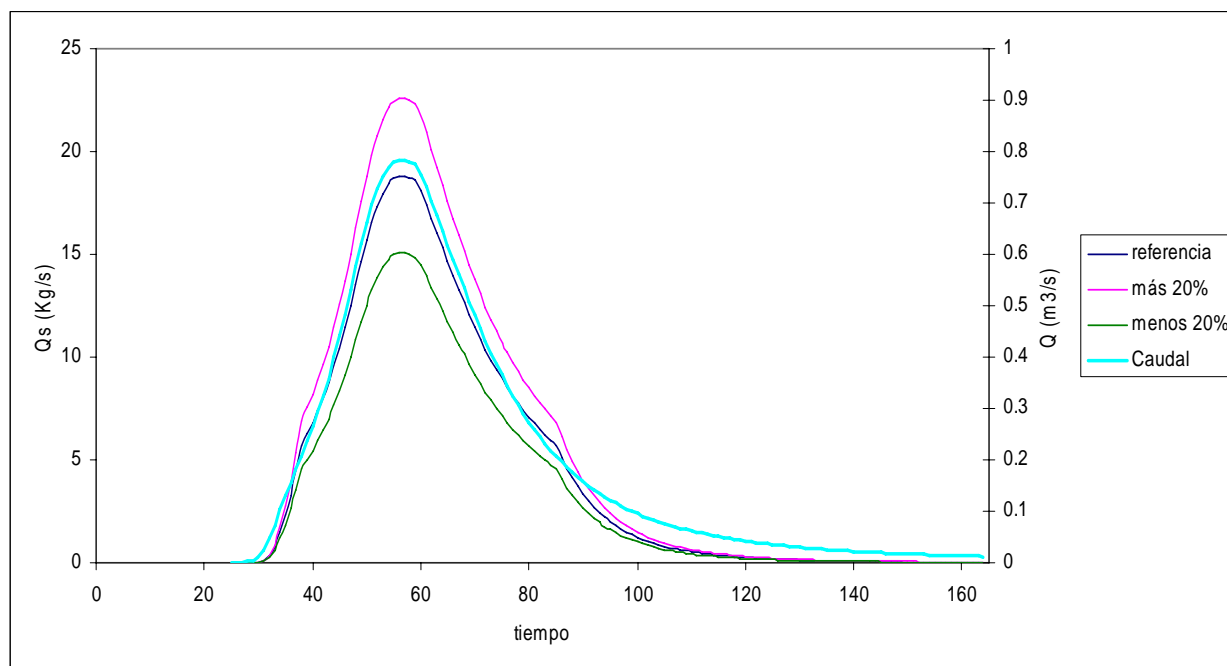
**Tabla 20:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión, deposición, sólido almacenado en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno  $T=2$  años en función de  $C$ . Cuenca Masdeu.

Valor $C$	ref	más 20%	dif %	menos 20%	dif %
qs punta (kg/s.m)	17.1	20.6	20.0	13.7	-20.0
t punta (min)	57	57	-	57	-
Sólido vertido (Kg)	38655	46386	20.0	30924	-20.0
Erosión (kg)	317621	381139	20.0	254093	-20.0
Deposición (Kg)	278500	334200	20.0	222800	-20.0

**Tabla 21:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro  $C$  para el periodo de retorno  $T=2$  años. Cuenca Masdeu.

Como se puede comprobar en la Tabla 4 valores grandes del parámetro  $C$  indican presencia de cubiertas vegetales del suelo que tienen más facilidad para ser erosionadas. El parámetro  $C$  además de controlar el desprendimiento por flujo también determina el valor de la capacidad de transporte; a mayor valor de  $C$  mayor capacidad de transporte (ver apartado de descripción del modelo).

Se puede ver en la Tabla 20 y en la Tabla 21 que para mayores parámetros de cubierta vegetal se tienen mayores valores de desprendimiento y de sedimentos vertidos en el punto de desagüe. Las diferencias relativas obtenidas al variar un 20% el parámetro de cubierta vegetal son muy significativas. Un incremento del 20% produce un incremento del 20% en el caudal sólido unitario, el sólido vertido en el punto de desagüe, el desprendimiento y la deposición. Si se disminuye un 20% el parámetro de cubierta vegetal todas las variables anteriores disminuyen un 20%. Seguidamente se presentan los sedigramas del análisis de variación del parámetro de cubierta de vegetal.



**Gráfico 37:** Sedigramas para cada cubierta vegetal analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años.

Para el periodo de retorno de diez años se han obtenido los siguientes resultados:

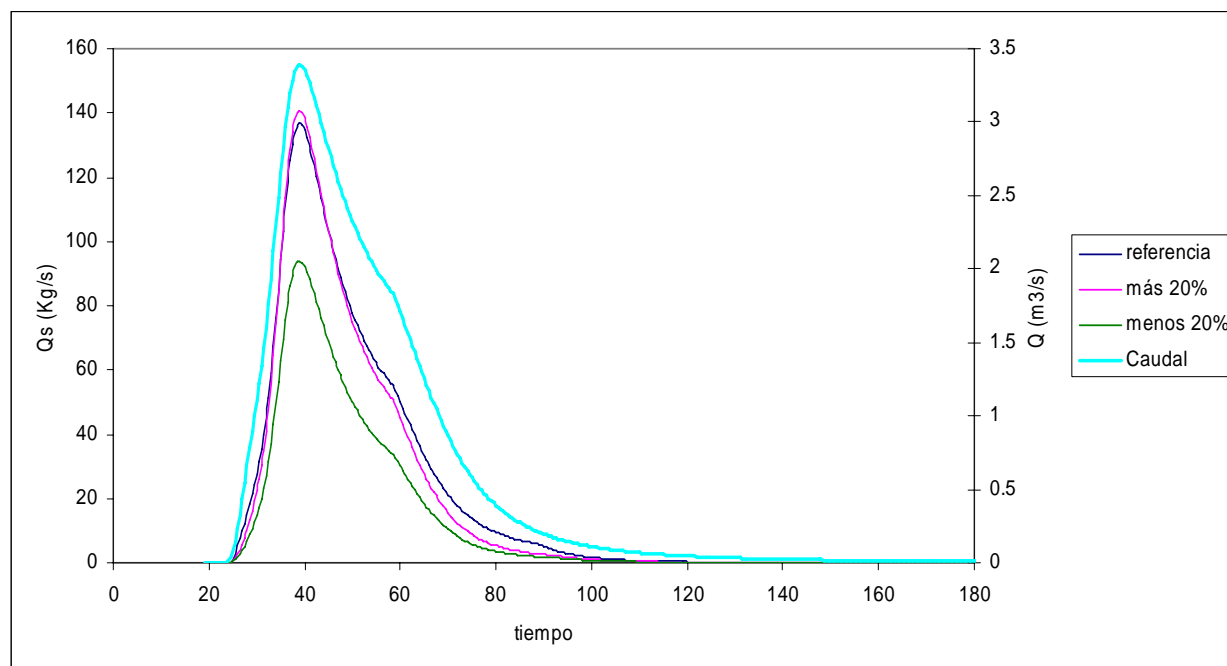
	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
C	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
referencia	194632	107460	16.2	554910	83.8	662370	484120	12.5	-16382	-8.4
más 20%	181405	128950	16.2	665890	83.8	794840	580940	15	32495	17.9
menos 20%	120936	85966	16.2	443930	83.8	529896	387290	10	21670	17.9

**Tabla 22:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro C. Cuenca Masdeu.

Valor C	ref	más 20%	dif %	menos 20%	dif %
qs punta (kg/s.m)	108.8	112.3	3.2	74.9	-31.2
t punta (min)	39	39	-	39	-
Sólido vertido (Kg)	194632	181405	-6.8	120936	-37.9
Erosión (kg)	662370	794840	20.0	529896	-20.0
Deposición (Kg)	484120	580940	20.0	387290	-20.0

**Tabla 23:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro C para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Masdeu.

En este caso, para el periodo de retorno de diez años, se repite el mismo patrón de comportamiento que en el análisis de sensibilidad del parámetro de erosionabilidad  $K$ . A continuación se muestran los sedigramas de los casos analizados para comprobar la variación del parámetro vegetal en el periodo de retorno de diez años. Incrementar el valor del parámetro de cubierta vegetal parece no modifica significativamente la cantidad de material vertido porque al haber tanto desprendimiento la salida de sólido queda determinada por la capacidad de carga.



**Gráfico 38:** Sedigramas para cada cubierta vegetal analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=10 años.

### 6.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA RED DE REGUEROS

El tercer análisis aplicado ha consistido en cuantificar la sensibilidad del cálculo erosivo en función de la red de regueros considerada. Las tres redes empleadas en este subapartado han sido las mostradas en el Gráfico 33. Los resultados obtenidos para el periodo de retorno de dos años se muestran a continuación.

Red	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
A	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
B	38934	29414	7.4	368310	92.6	397724	358920	40	-170	-0.4
C	39233	22485	4.3	500080	95.7	522565	483450	27	-145	-0.4

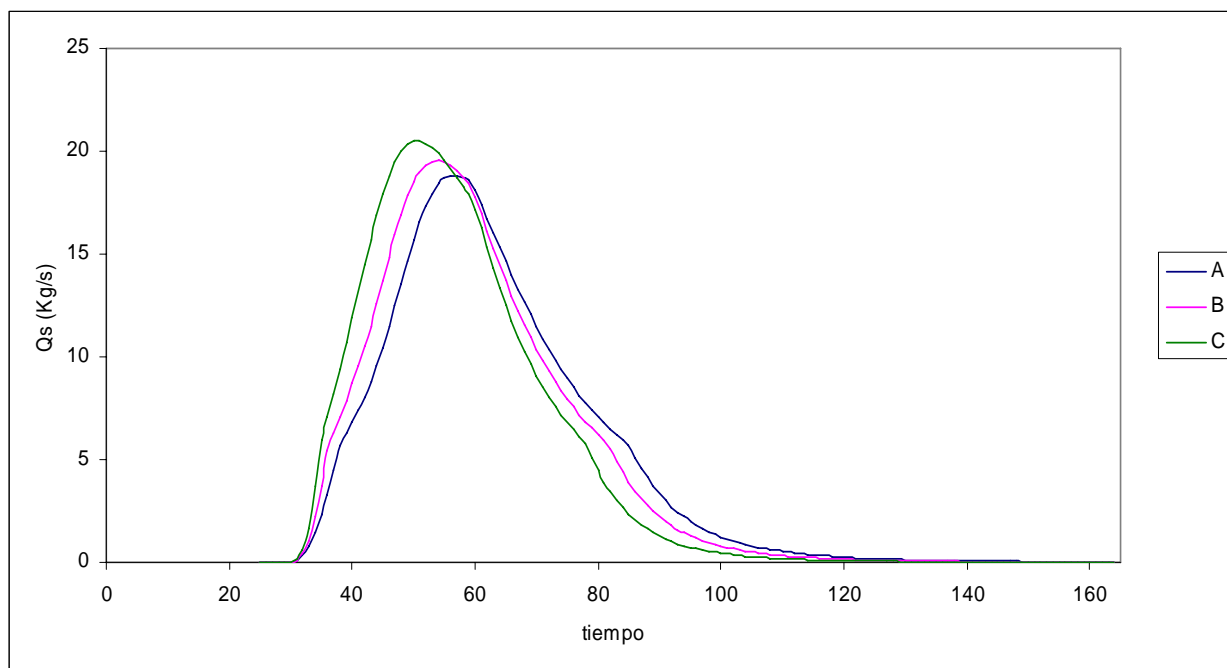
**Tabla 24:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función de la red de regueros. Cuenca Masdeu.

Red	A	más 20%	B	menos 20%	C
qs punta (kg/s.m)	17.1	17.8	3.8	18.6	8.4
t punta (min)	57	54	-	50	-
Sólido vertido (Kg)	37072	38934	5.0	39233	5.8
Erosión (kg)	350650	397724	13.4	522565	49.0
Deposición (Kg)	311900	358920	15.1	483450	55.0

**Tabla 25:** Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.

Cuanto más desarrollada es la red de regueros (red C) se tiene mayor porcentaje de desprendimiento de sedimentos en los regueros y además también se tiene mayor desprendimiento total

y mayor deposición. Al aumentar tanto el desprendimiento como la deposición, el sedigrama de salida de cuenca no se ve muy afectado; el caudal sólido punta y la cantidad total de sólido vertido presentan muy poca variación en las tres redes de regueros.



**Gráfico 39:** Sedigramas para cada red de regueros analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años.

Como ya se ha comentado más arriba, los sedigramas de salida de cuenca son prácticamente iguales para las tres redes de regueros. La principal diferencia que se observa es un adelantamiento del sedigrama y un incremento del caudal sólido punta cuando la red de regueros se encuentra más desarrollada. Si se observa el Gráfico 34 se puede comprobar que los hidrogramas de las diferentes redes de regueros tienen la misma forma que los sedigramas mostrados arriba.

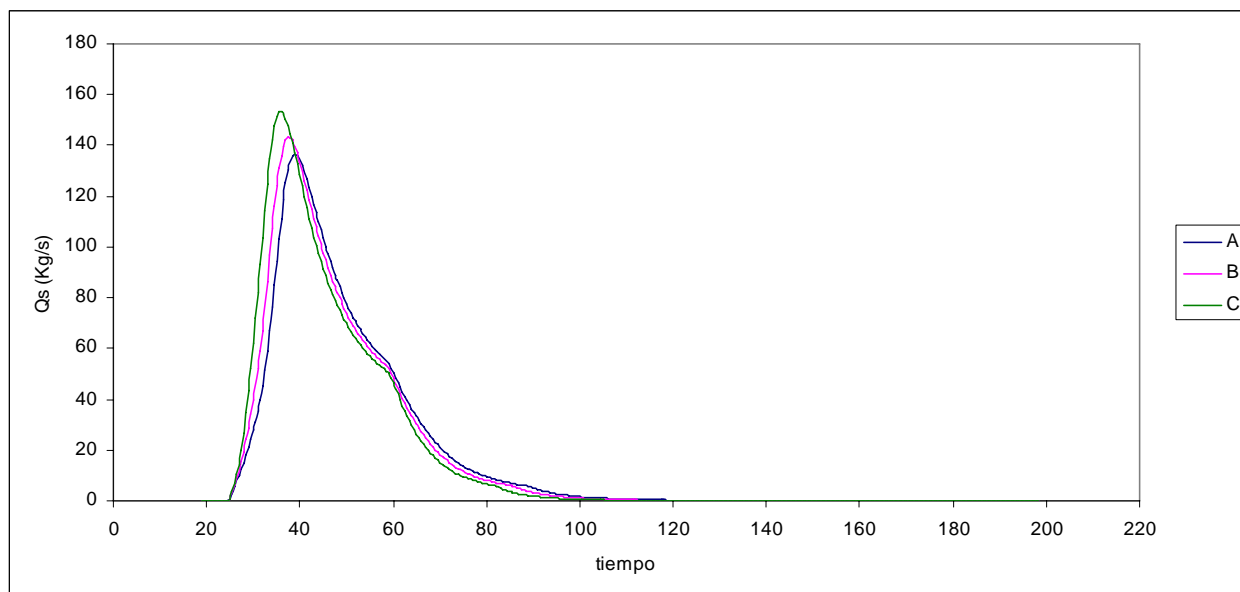
Los resultados para el periodo de retorno T=10 años, que se presentan a continuación, tienen un comportamiento análogo a los obtenidos para T=2 años.

Red	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
A	194632	107460	16.2	554910	83.8	662370	484120	12.5	-16382	-8.4
B	197729	89350	11.1	716610	88.9	805960	636530	9.7	-28299	-14.3
C	201487	68277	6.6	959290	93.4	1027567	868280	7.3	-42200	-20.9

**Tabla 26:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función de la red de regueros. Cuenca Masdeu.

Red	A	B	dif %	C	dif %
Qs punta (kg/s.m)	108.8	114.5	5.2	124.7	14.6
t punta (min)	44	44	-	44	-
Sólido vertido (Kg)	194632	197729	1.6	201487	3.5
Erosión (kg)	662370	805960	21.7	1027567	55.1
Deposición (Kg)	484120	636530	31.5	868280	79.4

**Tabla 27:** Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Masdeu.



**Gráfico 40:** Sedigramas para cada red de regueros analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=10 años.

## 6.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

El análisis de sensibilidad que se lleva a cabo a continuación aborda el estudio de las variaciones en el cálculo erosivo producidas por cambios en el valor de los parámetros de calibración. Los valores de referencia en este subapartado son los correspondientes al caso 1. Los rangos de valores empleados en la variación de dichos parámetros son similares a los empleados por Raveendra et al. (2007). En primer lugar se ha comprobado la sensibilidad del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Los valores de los parámetros analizados en cada caso se muestran en la tabla 28:

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
2	0.1	1	1
3	0.01	1	1
4	100	1	1
5	0.0001	1	1

**Tabla 28:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por impacto de lluvia.

Los resultados obtenidos para cada caso y para el periodo de retorno de dos años se muestran en las tablas siguientes.

Caso	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
1	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
2	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
3	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
4	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
5	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1

**Tabla 29:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Masdeu.



Caso	1	2	dif %	3	dif %	4	dif %	5	dif %
qs punta (kg/s.m)	17.1	17.1	0.0	17.1	0.0	17.1	0.0	17.1	0.0
t punta (min)	44	44	-	44	-	44	-	44	-
Sólido vertido (Kg)	38655	38655	0.0	38655	0.0	38655	0.0	38655	0.0
Erosión (kg)	317621	317621	0.0	317621	0.0	317621	0.0	317621	0.0
Deposición (Kg)	278500	278500	0.0	278500	0.0	278500	0.0	278500	0.0

**Tabla 30:** Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por impacto de lluvia para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.

De los resultados expuestos en la Tabla 29 y en la Tabla 30 se deduce que el modelo es insensible al valor del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Dicho de otra manera, los resultados del cálculo erosivo (desprendimiento total, deposición y sedimentos vertidos en el punto de desagüe) no dependen del valor de dicho parámetro. Esto es debido a que el grueso del desprendimiento ocurrido en la cuenca se produce mediante el flujo hidráulico.

Los siguientes casos tratan de evaluar el efecto de las variaciones del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo.

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
6	1	0.1	1
7	1	0.01	1
8	1	0.001	1
9	1	0.0001	1

**Tabla 31:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por flujo. Cuenca Masdeu.

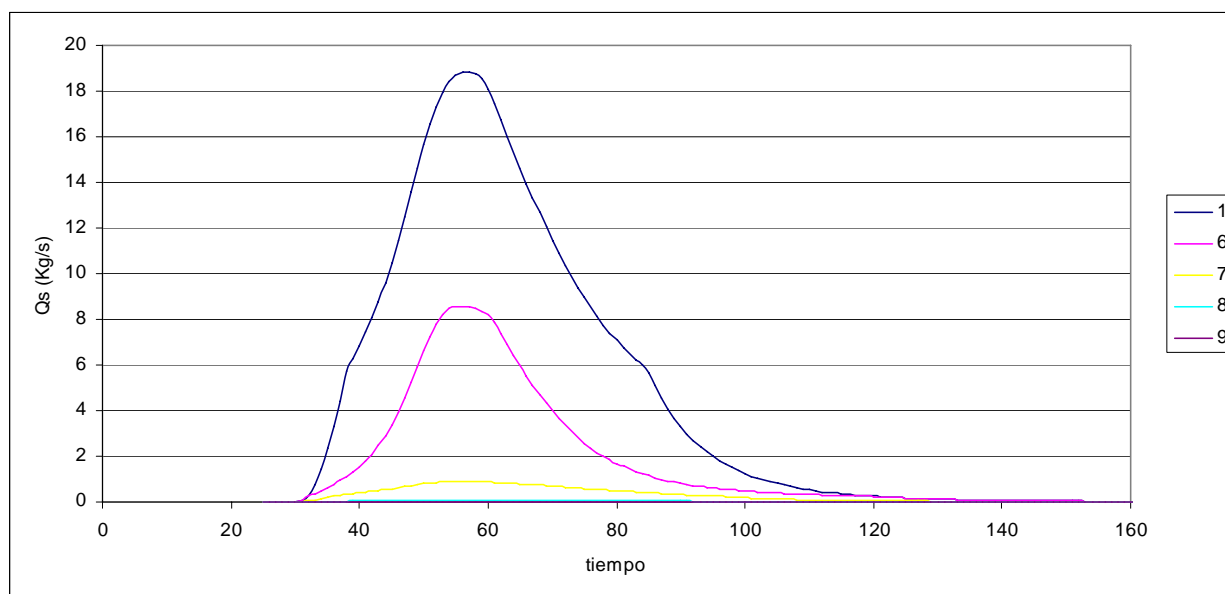
Caso	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
1	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
6	14409	3534	11.1	28228	88.9	31762	17295	47	11	0.1
7	2388	353.41	11.1	2822.8	88.9	3176.21	607	33	148	6.2
8	276	35.34	11.1	282.28	88.9	317.62	25	19	-3	-1.0
9	29	3.542	11.1	28.23	88.9	31.772	5	4	-6	-20.5

**Tabla 32:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Masdeu.

Caso	1	6	dif %	7	dif %	8	dif %	9	dif %
qs punta (kg/s.m)	17.1	7.8	-54.4	0.8	-95.2	0.1	-99.5	0.008	-100.0
t punta (min)	57	57	-	57	-	57	-	57	-
Sólido vertido (Kg)	37072	14409	-61.1	2388	-93.6	276	-99.3	29	-99.9
Erosión (kg)	350650	31762	-90.9	3176	-99.1	318	-99.9	32	-100.0
Deposición (Kg)	311900	17295	-94.5	607	-99.8	25	-100.0	5	-100.0

**Tabla 33:** Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.

A diferencia del parámetro de calibración por impacto de las gotas de lluvia el valor del parámetro de desprendimiento por flujo si que tiene influencia en el resultado del cálculo erosivo. Concretamente cada disminución de un orden de magnitud del parámetro produce una disminución del mismo orden en la masa de sedimento desprendido. Al disminuir el valor del desprendimiento también se disminuye la deposición y lógicamente, el sólido vertido por la cuenca. Los sedigramas del análisis del parámetro de desprendimiento por flujo tienen la siguiente forma (El caso analizado número nueve no se visualiza en el Gráfico 41 ya que la escala del eje de abcisas es demasiado grande. El caudal sólido máximo tiene un valor de 0.0081 Kg/s):



**Gráfico 41:** Sedigramas de los diferentes casos analizados en el análisis de sensibilidad del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.

El siguiente análisis se centra en el parámetro de calibración de la capacidad de transporte del flujo hidráulico.

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
10	1	1	0.1
11	1	1	10
12	1	1	100
13	1	1	0.01

**Tabla 34:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad de la capacidad de transporte del flujo hidráulico. Cuenca Masdeu.

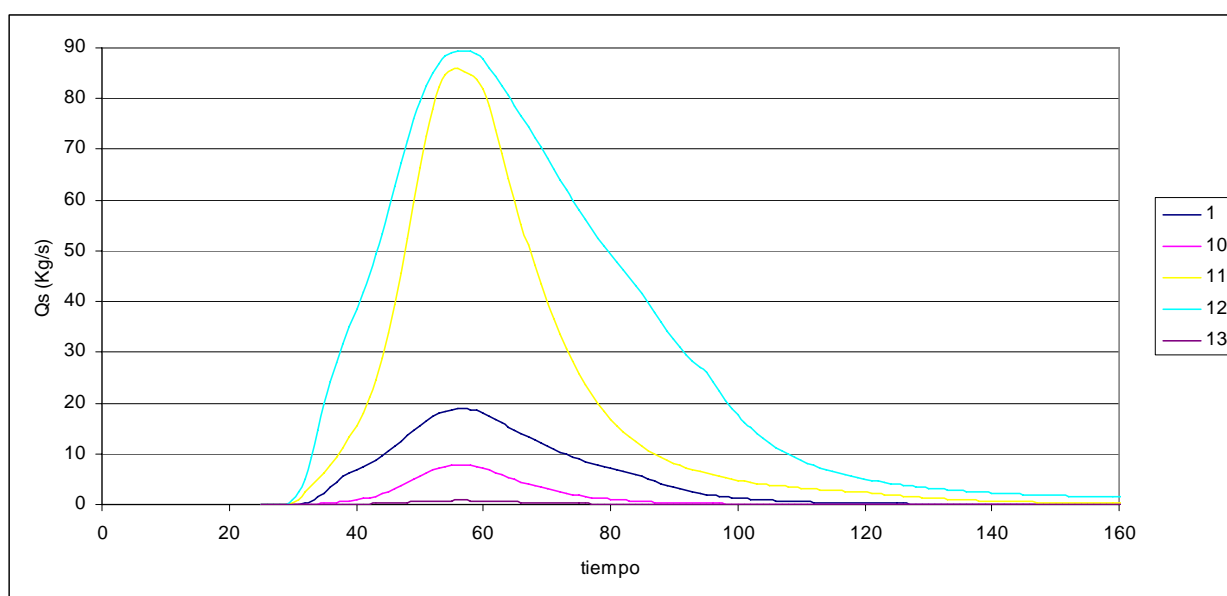
Caso	Sedigrama (kg)	Erosión					Dep (Kg)	Alm (kg)	Error Balance	
		horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)			Absoluto	Rel (%)
1	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
10	10862	35341	11.1	282280	88.9	317621	304330	6	2423	22.3
11	144086	35341	11.1	282280	88.9	317621	172950	470	115	0.1
12	238791	35341	11.1	282280	88.9	317621	60679	3308	14843	6.2
13	1086	35341	11.1	282280	88.9	317621	313930	0.6	2604	239.8

**Tabla 35:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Masdeu.

Caso	1	10	dif %	11	dif %	12	dif %	13	dif %
qs punta (kg/s.m)	17.1	7.1	-58.8	78.1	355.8	81.5	375.4	0.707	-95.9
t punta (min)	44	44	-	44	-	44	-	44	-
Sólido vertido (Kg)	38655	10862	-71.9	144086	272.7	238791	517.7	1086	-97.2
Erosión (kg)	317621	317621	0.0	317621	0.0	317621	0.0	317621	0.0
Deposición (Kg)	278500	304330	9.3	172950	-37.9	60679	-78.2	313930	12.7

**Tabla 36:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Masdeu.

El desprendimiento, por la formulación del modelo (ver apartado 3.4); no depende de la carga de sedimentos acarreada por el flujo. Otra formulación podría suponer que cuando el flujo alcanzara la capacidad de carga, el desprendimiento fuera nulo; de esta manera para cada valor del parámetro de calibración de la capacidad de carga se tendría un valor diferente de desprendimiento. Se ha optado por la formulación escogida para simplificar el modelo, así siempre se tiene el mismo valor de desprendimiento.



**Gráfico 42:** Sedigramas de los diferentes casos analizados en el análisis de sensibilidad del parámetro de calibración de la capacidad de transporte para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Masdeu.

- En la cuenca Montbau se ha desarrollado el mismo análisis de sensibilidad de parámetros erosivos que el realizado para la cuenca Masdeu. Si se quiere consultar con detalle los resultados de dicho análisis, éstos se encuentran en el Anejo 4. A continuación se resumen sus principales conclusiones. En primer lugar cabe destacar que la respuesta del modelo a la variación de los parámetros erosivos en la cuenca Montbau presenta un comportamiento similar al acaecido en la cuenca Masdeu. Una de las principales diferencias entre la respuesta de las dos cuencas es que la erosión en Montbau se encuentra más controlada por la hidrología y la topografía (es decir, es menos sensible a las variaciones de los parámetros puramente erosivos). Esto es debido a que los flujos producidos en Montbau son menos competentes que los producidos en Masdeu y fácilmente adquieren la capacidad de carga (por ejemplo, en la lluvia de dos años, la variación en el parámetro de erosionabilidad  $K$  no produce ninguna variación en el sedigrama de salida de cuenca).



## 7. RESULTADOS

### 7.1 COMPARACIÓN DEL MODELO EROSIVO DESARROLLADO CON OTRAS METODOLOGÍAS

El modelo de cálculo erosivo propuesto en este trabajo necesita ajustar los valores de los coeficientes de calibración de las expresiones del desprendimiento y de la capacidad de transporte para poder predecir valores aproximados a la realidad. Para poder realizar dicho proceso es necesario disponer de datos de cuencas experimentales instrumentadas que registren valores de precipitación, caudal y caudal sólido en la salida de cuenca. Dicho tipo de cuenca son muy poco comunes y acceder a los datos que generan es complicado. Debido a esta razón en este estudio no se dispone de datos reales de erosión en cuencas que puedan servir para ajustar el modelo erosivo.

Por los motivos explicados se ha decidido realizar la comparación del modelo con el resultado proporcionado por la ecuación MUSLE propuesta por Williams (ver apartado 2.2.1.1). Se ha utilizado esta metodología para compararla con el modelo desarrollado en este estudio porque se trata de una de las ecuaciones más extendidas para el cálculo de producción de sedimentos a nivel de eventos. La metodología propuesta en este estudio obtiene sedigramas en la salida de cuenca (y en cualquier otro punto de la cuenca), la carga de sólido total encerrada bajo la curva de dichos sedigramas se compara con el valor calculado con la ecuación MUSLE.

Con la comparación del cálculo erosivo se obtienen los valores de los parámetros de calibración (ver apartado 3.4) que mejor ajustan el valor calculado con el obtenido con la MUSLE. La calibración del modelo erosivo se realiza para las lluvias sintéticas de dos, cinco, diez, veinte, cincuenta, cien, doscientos y quinientos años de periodo de retorno mostradas en el apartado 4.2.

Los resultados del análisis de sensibilidad muestran que los únicos parámetros que tienen importancia en el cálculo erosivo son el parámetro de calibración de la expresión de desprendimiento por flujo ( $\xi_F$ ) y el de la expresión de la capacidad de transporte ( $\xi_{tc}$ ). El primero determina directamente el valor del desprendimiento e indirectamente el de la deposición y el de sólido vertido por el punto de desagüe; el segundo parámetro determina el valor de la deposición e indirectamente el de sólido vertido por la cuenca.

#### 7.1.1 PARÁMETROS Y VALORES OBTENIDOS CON LA METODOLOGÍA MUSLE

Como se ha comentado anteriormente la obtención del valor de estos dos parámetros se realiza ajustando el valor de sedimentos vertidos por el sedigrama del punto de desagüe con el valor de la ecuación MUSLE. La expresión de dicha ecuación es la siguiente:

$$A = 11.78 \cdot (P \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

Donde  $A$  es el suelo vertido por una cuenca expresado en toneladas y producido en un evento de lluvia;  $P$  es la precipitación del evento expresada en mm;  $q_p$  es el caudal punta en m<sup>3</sup>/s; el resto de parámetros son los coeficientes de la ecuación USLE (apartado 2.1.5) y en nuestras cuencas de estudio tienen los siguientes valores:

	Montbau		Masdeu	Unidades
K	0.058	K	0.058	t.ha.h/ha.MJ.mm
LS	8.42	LS	6.43	-
C	0.11	C	0.11	-
P	1	P	1	-

**Tabla 37:** Parámetros MUSLE de las dos cuencas de estudio.

La precipitación y el caudal punta generados por las lluvias sintéticas son los siguientes para la cuenca Masdeu:

	Masdeu			Montbau		
T2	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	0.78	0.77	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	0.15	0.34
	P (mm)	2.96		P (mm)	2.18	
T5	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	2.12	2.17	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	0.42	1.02
	P (mm)	6.87		P (mm)	5.59	
T10	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	3.38	3.54	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	0.69	1.73
	P (mm)	10.35		P (mm)	8.72	
T20	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	4.92	5.17	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.05	2.62
	P (mm)	13.98		P (mm)	12.04	
T50	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	7.14	7.51	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.54	3.87
	P (mm)	18.78		P (mm)	16.47	
T100	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	8.88	9.34	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	1.92	4.85
	P (mm)	22.31		P (mm)	19.77	
T200	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	10.57	11.16	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	2.32	5.87
	P (mm)	25.75		P (mm)	22.99	
T500	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	12.7	13.51	Q <sub>p</sub> (m <sup>3</sup> /s)	2.86	7.24
	P (mm)	30.13		P (mm)	27.11	

**Tabla 38:** Caudal punta, precipitación y material vertido (toneladas) en cada lluvia de diseño.

## 7.1.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN

Para la cuenca Masdeu se han obtenido los siguientes valores de los parámetros de calibración:

	Parámetros de calibración		Erosión		Error	
Caso	Flujo	Transporte	Calculada	MUSLE	Absoluto	Rel (%)
T2	0.005	0.055	763	770	7	0.9
T5	0.006	0.065	2046	2160	114	5.3
T10	0.008	0.08	3673	3530	-143	-4.1
T20	0.009	0.093	5101	5160	59	1.1
T50	0.011	0.11	7615	7500	-115	-1.5
T100	0.012	0.123	9370	9340	-30	-0.3
T200	0.013	0.13	11206	11160	-46	-0.4
T500	0.014	0.14	13497	13500	3	0.0

**Tabla 39:** Valores obtenidos de los parámetros de calibración para cada lluvia de diseño. Cuenca Masdeu.

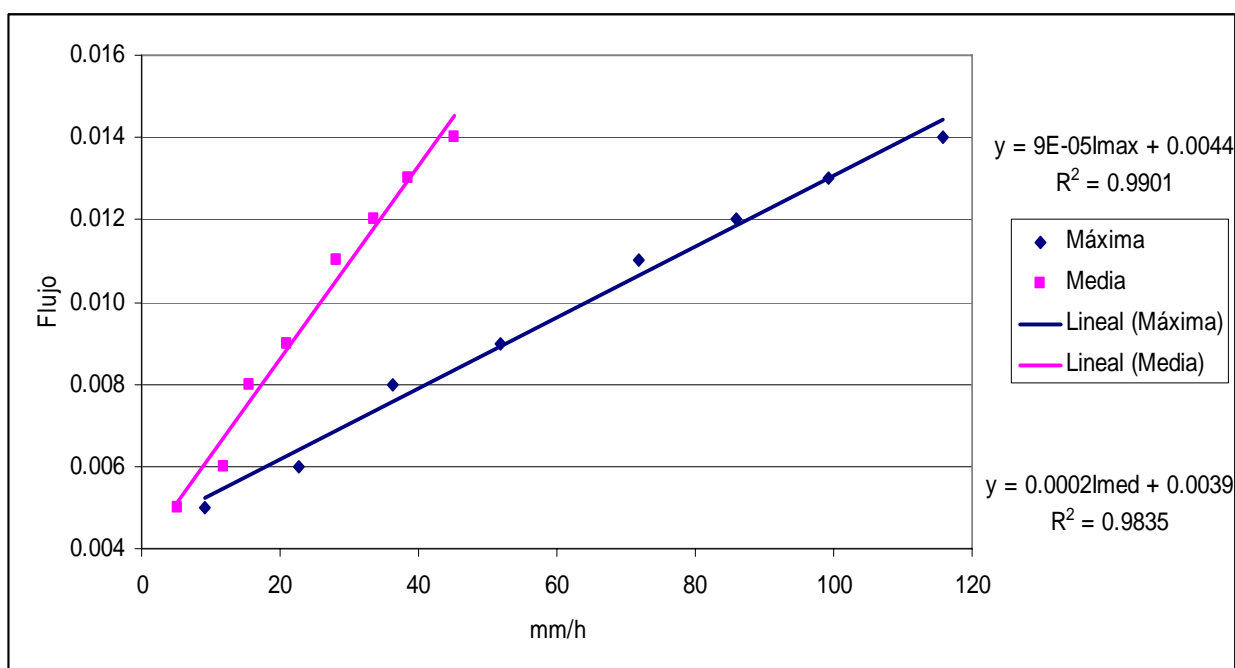
Como se puede comprobar, los valores de los parámetros de calibración se encuentran dentro de un rango muy ajustado aunque las lluvias de diseño presenten intensidades de precipitación muy diferentes. Se han representado los diferentes valores de dichos parámetros en función de las características de la lluvia de diseño (intensidad media de precipitación neta e intensidad máxima de precipitación neta).

Lluvia	P neta total		I media	I máxima
	(mm)	(h)	(mm/h)	(mm/h)
T2	2.96	0.58	5.1	9.07
T5	6.87	0.58	11.8	22.67
T10	10.35	0.67	15.5	36.18
T20	13.98	0.67	21.0	51.96
T50	18.78	0.67	28.2	71.88
T100	22.31	0.67	33.5	85.92
T200	25.75	0.67	38.6	99.36
T500	30.13	0.67	45.2	115.92

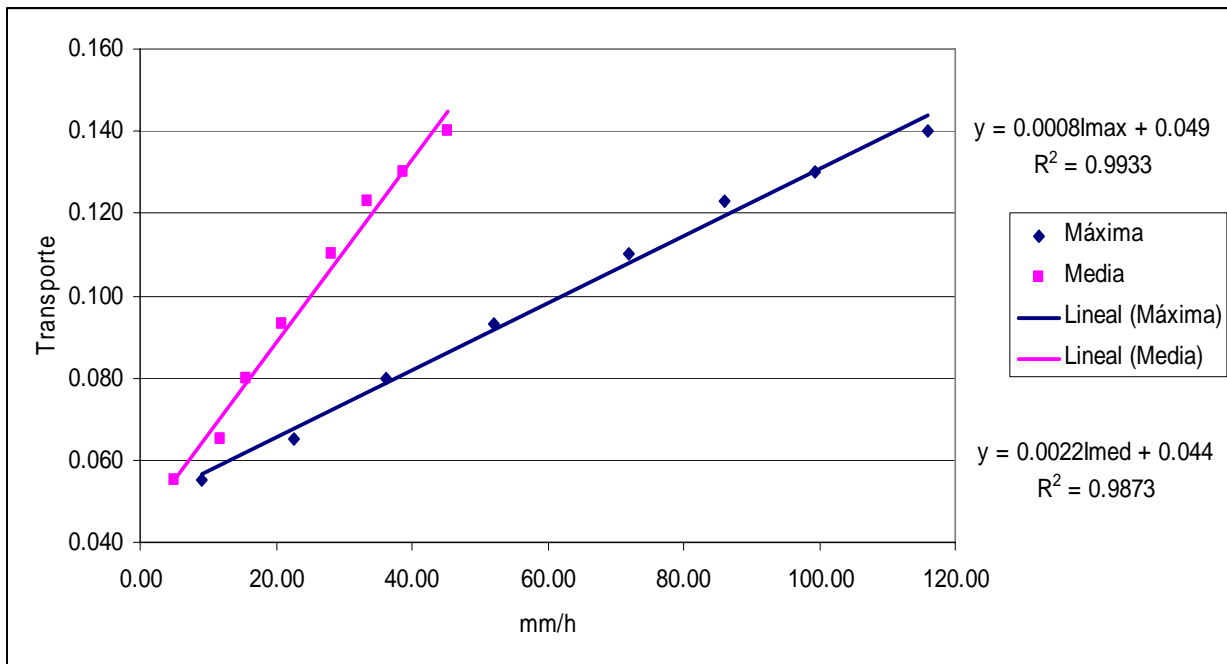
**Tabla 40:** Precipitación neta, intensidad media e intensidad máxima de precipitación neta para cada periodo de retorno. Cuenca Masdeu.

Para poder analizar mejor el comportamiento de los parámetros de calibración, se ha decidido graficar los valores de dichos parámetros en función de las intensidades media y máxima de precipitación neta. Se ha optado por utilizar la intensidad de precipitación neta, en vez de la bruta, como variable característica de la lluvia ya que ésta es la responsable directa de la aparición del flujo y del mayor porcentaje de erosión hídrica. La erosión por salpicadura está controlada por la intensidad de precipitación bruta; pero como se ha visto en el apartado 6 ésta es despreciable.

La tendencia que presenta valor de los parámetros de calibración en función de la lluvia es muy clara (Gráfico 43 y Gráfico 44). Tanto para el parámetro de calibración de desprendimiento por flujo como para el de la capacidad de transporte, se observa que para mayores intensidades tenemos mayores valores de dichos parámetros. En ambos casos se observa que la proporcionalidad es bastante lineal.



**Gráfico 43:** Valor del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Masdeu.



**Gráfico 44:** Valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Masdeu.

Como se acaba de comentar, la proporcionalidad entre el valor del parámetro y la intensidad es muy lineal. Tanto, que ambos parámetros se ajustan bastante bien en una regresión lineal; obteniéndose de este modo una expresión para predecir el valor de los parámetros en función de la intensidad de lluvia neta. Para el parámetro de desprendimiento por flujo (Gráfico 43) se obtienen las siguientes expresiones:

$$\xi_f = 0.00009 \cdot I_{MAX} + 0.0044$$

o

$$\xi_f = 0.0002 \cdot I_{MED} + 0.0039$$

Donde  $I_{MAX}$  es la intensidad punta (mm/h) e  $I_{MED}$  es la intensidad media (mm/h; Precipitación neta /duración lluvia neta) de precipitación neta. El parámetro de capacidad de carga se describe mediante las siguientes ecuaciones:

$$\xi_{tc} = 0.0008 \cdot I_{MAX} + 0.049$$

o

$$\xi_{tc} = 0.0022 \cdot I_{MED} + 0.044$$

Las intensidades se refieren a intervalos de cinco minutos de duración. Tanto las expresiones del parámetro de desprendimiento por flujo como las del de capacidad de carga son válidas solamente para la cuenca Masdeu y para eventos con intensidades medias de precipitación neta inferiores a 93.7 mm/h o intensidades punta inferiores a 308.4 mm/h. En caso de que para la intensidad media y máxima se tuvieran diferentes valores de los parámetros una buena solución sería calcular la media de ambos valores.



La calibración del modelo erosivo para la cuenca Montbau genera los siguientes valores de los parámetros de calibración para cada periodo de retorno:

Caso	Parámetros de calibración		Erosión		Error	
	Flujo	Transporte	Calculada	MUSLE	Absoluto	Rel (%)
T2	0.0070	0.075	354	340	-14	-4.1
T5	0.0085	0.075	981	1020	39	3.8
T10	0.0090	0.08	1686	1730	44	2.5
T20	0.0095	0.08	2603	2620	17	0.6
T50	0.0095	0.08	4010	3870	-140	-3.6
T100	0.0095	0.075	5031	4850	-181	-3.7
T200	0.0085	0.075	6118	5870	-248	-4.2
T500	0.0085	0.075	7527	7240	-287	-4.0

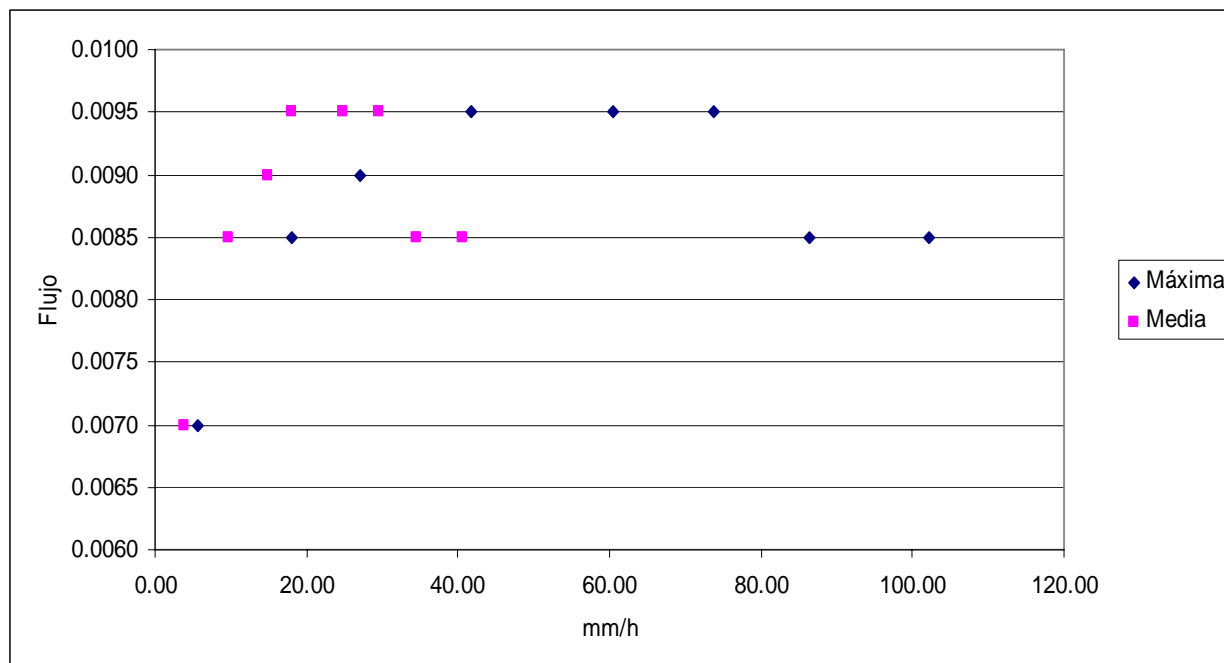
**Tabla 41:** Valores obtenidos de los parámetros de calibración para cada lluvia de diseño. Cuenca Montbau.

En la cuenca Montbau, a diferencia de lo ocurrida en Masdeu, el único parámetro que parece ser sensible a las diferentes lluvias es el de desprendimiento por flujo. Se han representado los valores de los parámetros en función de las características de la lluvia de diseño (intensidad media de precipitación neta e intensidad máxima de precipitación neta).

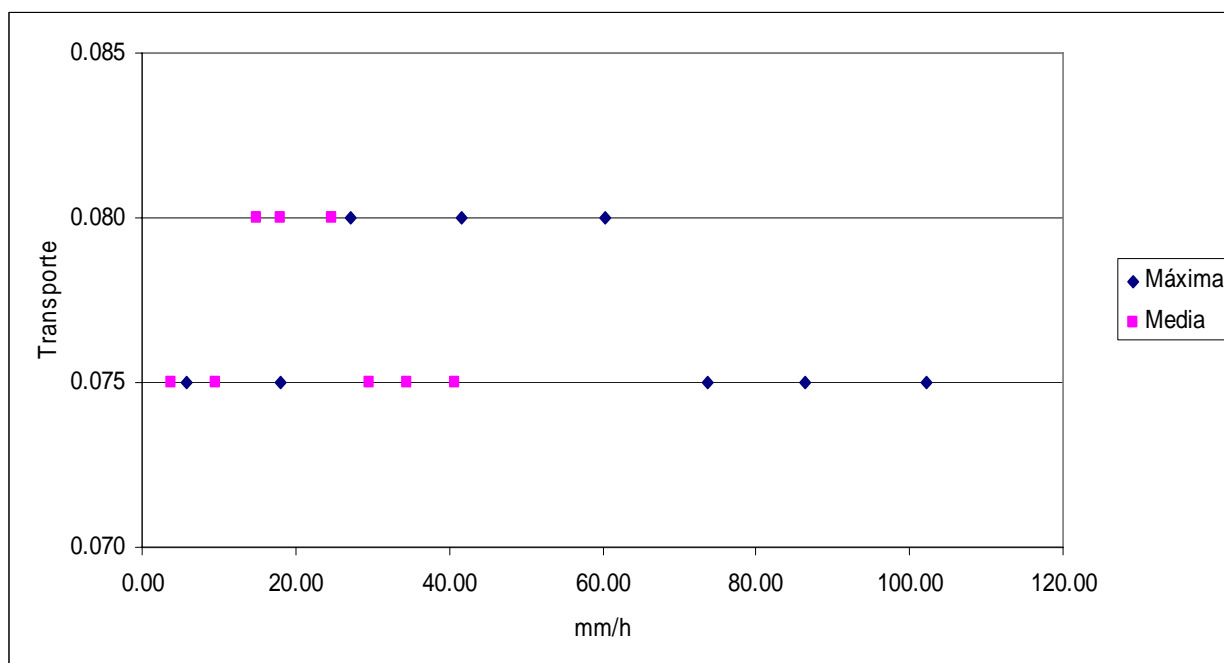
Lluvia	P neta total		I media (mm/h)	I máxima (mm/h)
	(mm)	(h)		
T2	2.18	0.58	3.7	5.71
T5	5.60	0.58	9.6	18.12
T10	8.72	0.58	14.9	27.06
T20	12.04	0.67	18.1	41.70
T50	16.47	0.67	24.7	60.35
T100	19.77	0.67	29.7	73.68
T200	22.99	0.67	34.5	86.40
T500	27.11	0.67	40.7	102.23

**Tabla 42:** Precipitación neta, intensidad media e intensidad máxima de precipitación neta para cada periodo de retorno. Cuenca Montbau.

El comportamiento del valor de los parámetros de calibración en función de la intensidad media y máxima mostradas en la Tabla 42 se muestra en los siguientes gráficos. El parámetro de calibración del desprendimiento es variable en función de la intensidad de la lluvia. La tendencia que muestra es que para mayores intensidades de lluvia neta mayor valor de dicho parámetro. En el Gráfico 45 se ha realizado una regresión logarítmica que determina el valor del parámetro en función de la intensidad. El parámetro de calibración de la capacidad de transporte tiene valores muy parecidos para todas las lluvias de diseño. La tendencia que muestra es que su valor no depende de la intensidad de la precipitación considerada. Para la cuenca Montbau se considera que dicho parámetro tiene un valor de 0.077.



**Gráfico 45:** Valor del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Montbau.



**Gráfico 46:** Valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte en función de la intensidad media y máxima de precipitación neta. Cuenca Montbau.

Para la cuenca Montbau; el valor del parámetro del desprendimiento por flujo está comprendido entre 0.085 y 0.095. Estos valores para los parámetros de calibración tienen validez solamente si son aplicadas para la cuenca Montbau y para eventos de precipitación (bruta) con intensidades medias que no superen los 93.7 mm/h o intensidades máximas inferiores a 308.4 mm/h.

Como se puede ver en los gráficos mostrados en este apartado, el valor de los parámetros de calibración presenta un comportamiento en función de las lluvias empleadas diferente para las dos cuencas. Mientras en Masdeu los valores presentan un comportamiento lineal enfrente de la intensidad de precipitación neta, en Montbau éstos son prácticamente constantes. Como ya se mencionado en el párrafo final del apartado de análisis de sensibilidad de los parámetros erosivos, este hecho puede ser debido a que la cuenca Montbau presenta una respuesta erosiva más controlada por la hidrología y la topografía que por los parámetros que forman parte de la formulación de los procesos actuantes en el fenómeno erosivo (desprendimiento y capacidad de carga).

## 7.2 COMPARACIÓN DEL MODELO EROSIVO CON MÉTODOS DE EROSIÓN ANUAL

En este apartado se presentan los resultados de generación de sedimentos en las dos cuencas de estudio producidos por una serie de lluvia anual y calculados con el modelo erosivo propuesto en este estudio. Dichos resultados se han comparado con diferentes metodologías que proporcionan valores de erosión anual. Los datos de lluvia bruta se corresponden con los observados el año 1991 en la localidad de Granollers.

Las pérdidas de precipitación se han calculado de la manera explicada en el apartado 3.2 y considerando los parámetros mostrados en el apartado 4.1. Los eventos de lluvia considerados pueden consultarse en el anejo 1. El cálculo erosivo se desarrollado considerando los valores de los coeficientes de calibración obtenidos en el la comparación del modelo erosivo propuesta con la metodología MUSLE (ver apartado 7.1). Los resultados de erosión obtenidos con la metodología desarrollada en este estudio se muestran en la tabla a continuación:

Evento	CUENCA MASDEU				CUENCA MONTBAU			
	Sólido (Kg)	Volumen (m3)	Erosión (Kg)	Deposición (Kg)	Sólido (Kg)	Volumen (m3)	Erosión (Kg)	Deposición (Kg)
1	971	0.49	4638	3660	609	0.30	9539	8903
2	0.17	0.00	241	240	-	-	-	-
3	284	0.14	2602	2301	95	0.05	5176	5069
4	15	0.01	731	711	3.75	0.00	1631	1622
5	1.46	0.00	296	294	-	-	-	-
6	72.5	0.04	1102	1023	9.25	0.00	2118	2109
7	105	0.05	1151	1039	12	0.01	1718	1704
8	3.11	0.00	485	460	-	-	-	-
9	0.7	0.00	242	241	-	-	-	-
10	325	0.16	1763	1433	134	0.07	3392	3245
11	424	0.21	1841	1416	230	0.12	3492	3250
12	88	0.04	1042	947	13	0.01	1782	1764
13	274	0.14	2655	2366	60	0.03	5251	5174
14	80	0.04	958	872	28	0.01	1923	1890
15	1210	0.61	4870	3660	923	0.46	10633	9674
16	146	0.07	1309	1115	26	0.01	2360	2330
17	1494	0.75	8763	7450	1089	0.54	21503	20450
18	958	0.48	6417	5545	782	0.39	16637	15870
<b>TOTAL (ud/año)</b>	<b>6451.94</b>	<b>3.23</b>	<b>41106</b>	<b>34773</b>	<b>4014</b>	<b>2.01</b>	<b>87155</b>	<b>83054</b>
<b>TOTAL (ud/ha.año)</b>	<b>113.07</b>	<b>0.06</b>	<b>720.4</b>	<b>609.41</b>	<b>294.28</b>	<b>0.15</b>	<b>6390</b>	<b>6090</b>

**Tabla 43:** Sólido vertido, volumen ocupado por éste, desprendimiento y deposición en ambas cuencas para cada evento de lluvia neta de la serie anual.

La aportación de sedimentos es mayor en la cuenca Masdeu, donde se vierten aproximadamente 6.5 toneladas anuales por las 4 toneladas vertidas en la cuenca Montbau. Al ser una cuenca más pequeña, la contribución de sedimento por hectárea es notablemente mayor en la cuenca Montbau (113 Kg/ha en la cuenca Masdeu y de 294 Kg/ha en la cuenca Montbau). Además de la cantidad de sólido vertido, en la cuenca Montbau también es mucho mayor la cantidad de material desprendido y depositado (más del doble que en la cuenca Masdeu).

El mayor desprendimiento ocurrido en la cuenca Montbau (En la cuenca Masdeu se deposita el 84,6% del material desprendido, mientras que en Montbau se deposita el 95,3%) se explica por la mayor pendiente que presenta esta cuenca. El hecho de que se deposite tanto material se debe a que la extensión de la cuenca no puede generar grandes caudales y por lo tanto los flujos generados tendrán poca capacidad de carga.

Los parámetros de la ecuación USLE juntamente con los resultados proporcionados por ésta metodología para ambas cuencas se muestran a continuación:

	Masdeu	Montbau	Unidades
R	61.04	56.07	MJ.mm/ha.h.año
K	0.058	0.058	t.ha.h/ha.MJ.mm
C	0.11	0.11	
LS	6.43	8.425	
P	1	1	
Pérdida de suelo	2.5	3.01	t/ha.año
	143	41	t/año

**Tabla 44:** Parámetros y resultados ecuación USLE.

Además de calcular la erosión anual mediante la ecuación USLE, también se ha calculado con el método de Fournier y la ecuación de Djorovic (apartados 2.1.3 y 2.1.4 respectivamente). Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

		Masdeu	Montbau
Fournier	t/ha.año	3.75	3.75
	t/año	213.75	51.15
Djorovic	t/ha.año	8.53	9.32
	t/año	486.21	127.12

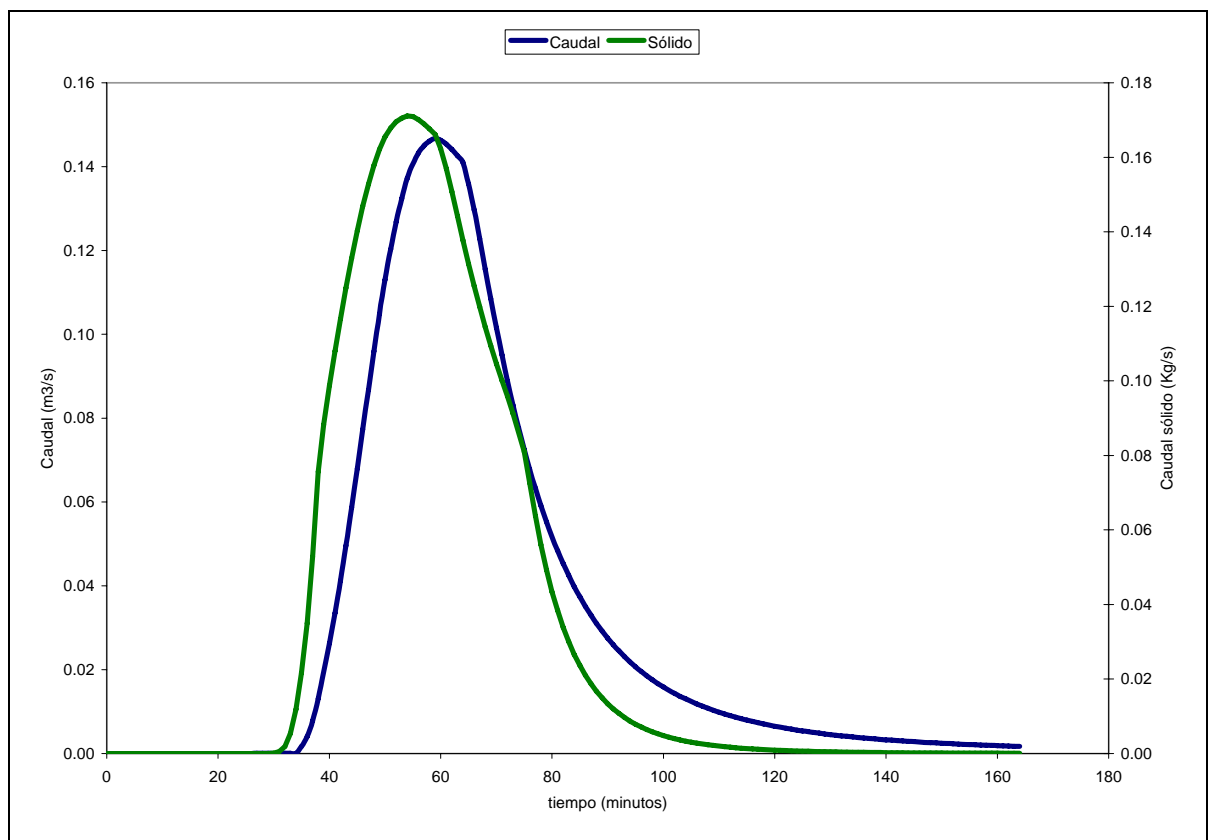
**Tabla 45:** Resultados método de Fournier y ecuación de Djorovic.

La estimación de la erosión anual de la ecuación USLE, como se puede observar en la Tabla 43 y en la tabla Tabla 43, se encuentra sobrestimada respecto a los resultados obtenidos con la metodología propuesta. Lo mismo sucede con los otros dos modelos usados; tanto Fournier como Djorovic producen valores sobrestimados de producción de sedimentos.

### 7.3 EROSIÓN LLUVIAS DE DISEÑO

En este apartado se muestran los valores de producción de erosión generados en las dos cuencas del estudio, con los valores de los parámetros de calibración calculados en el apartado anterior y para las lluvias de diseño de dos, cinco y diez años. En primer lugar se muestran los sedigramas y los hidrogramas que los generan y posteriormente se muestran en una tabla las principales variables de interés.

Además se realizará un mapa de las cuencas de estudio donde se mostrará la relación deposición total / desprendimiento total de cada celda para cada evento. Este mapa permitirá discriminar qué partes de las cuencas son mayoritariamente productoras de sedimentos y cuáles por el contrario tienen más sedimentación.



**Gráfico 47:** Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Montbau para T2 años.

En la Imagen 8 se muestra la relación deposición/desprendimiento en el interior de la cuenca Montbau para la lluvia de diseño de dos años de periodo de retorno. En rojo se marcan las zonas donde sólo produce desprendimiento, en amarillo las zonas donde el desprendimiento es superior a la deposición, en naranja las zonas donde la deposición es superior al desprendimiento y en verde las zonas donde solamente se produce deposición.

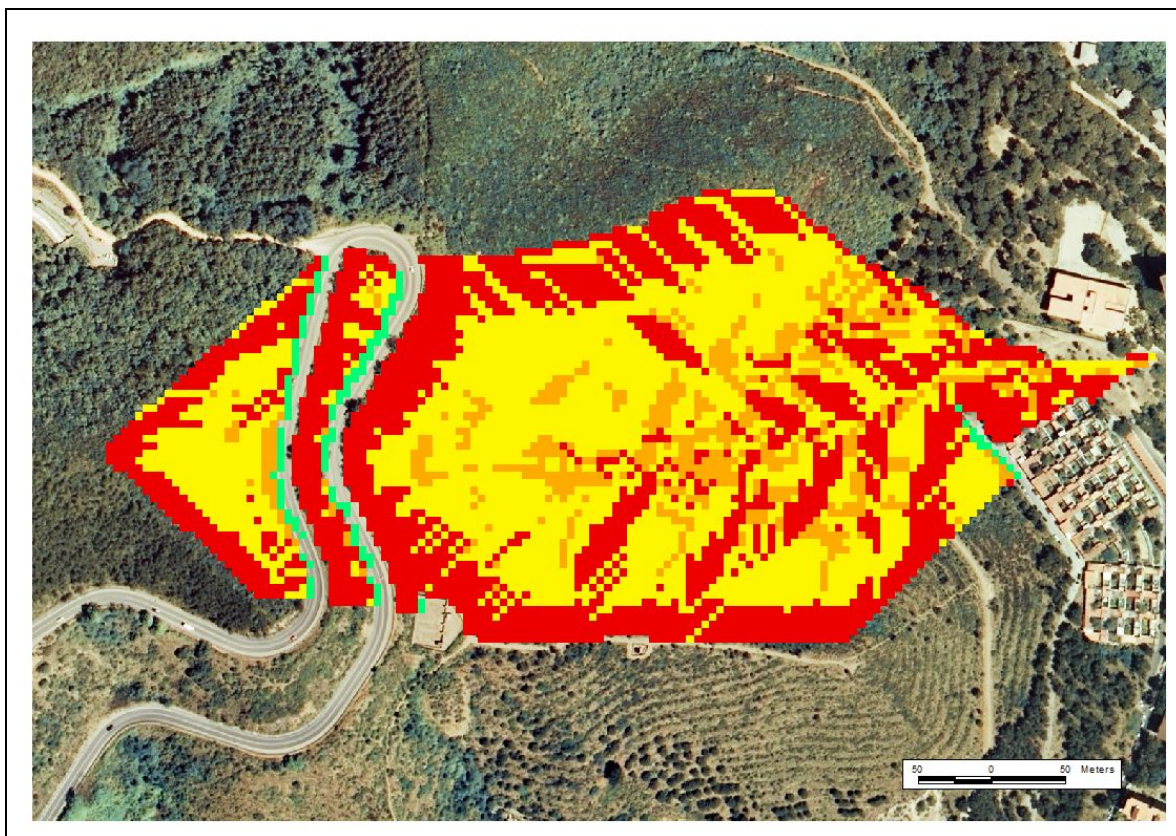


Imagen 8: Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T2. Cuenca Montbau

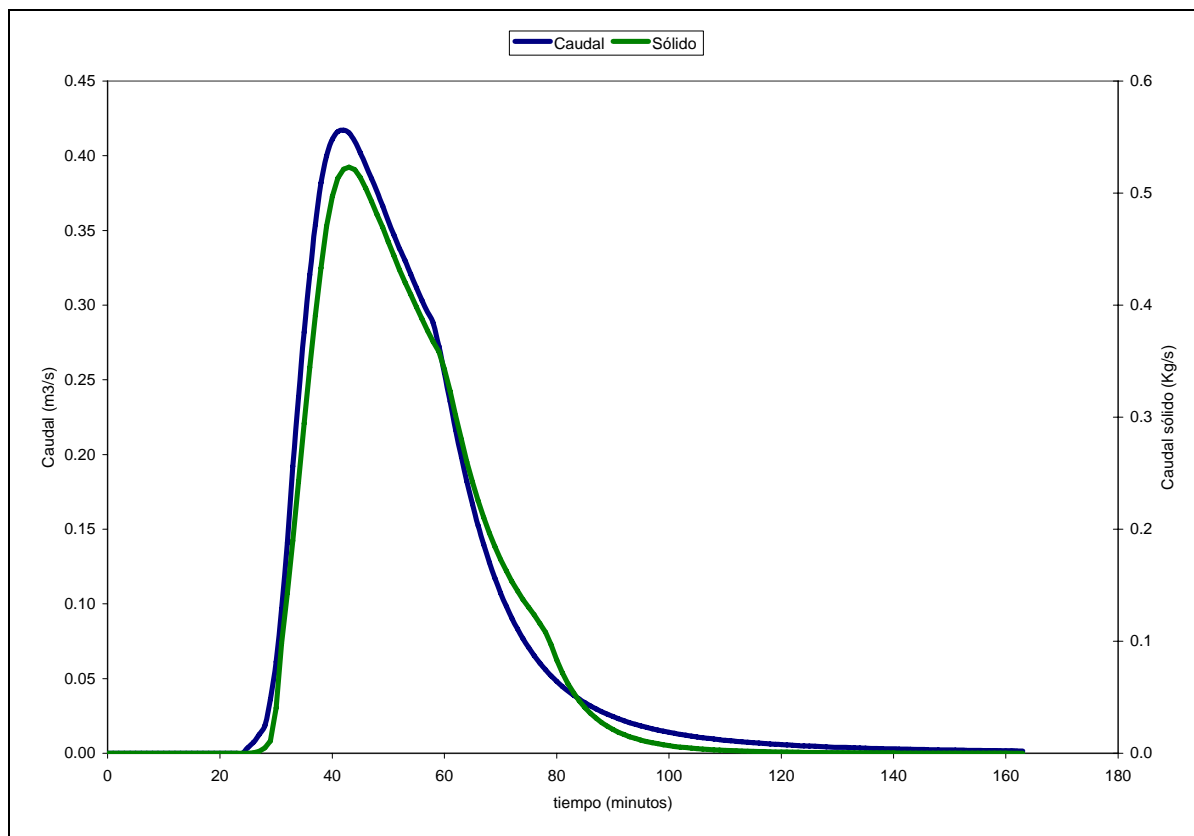
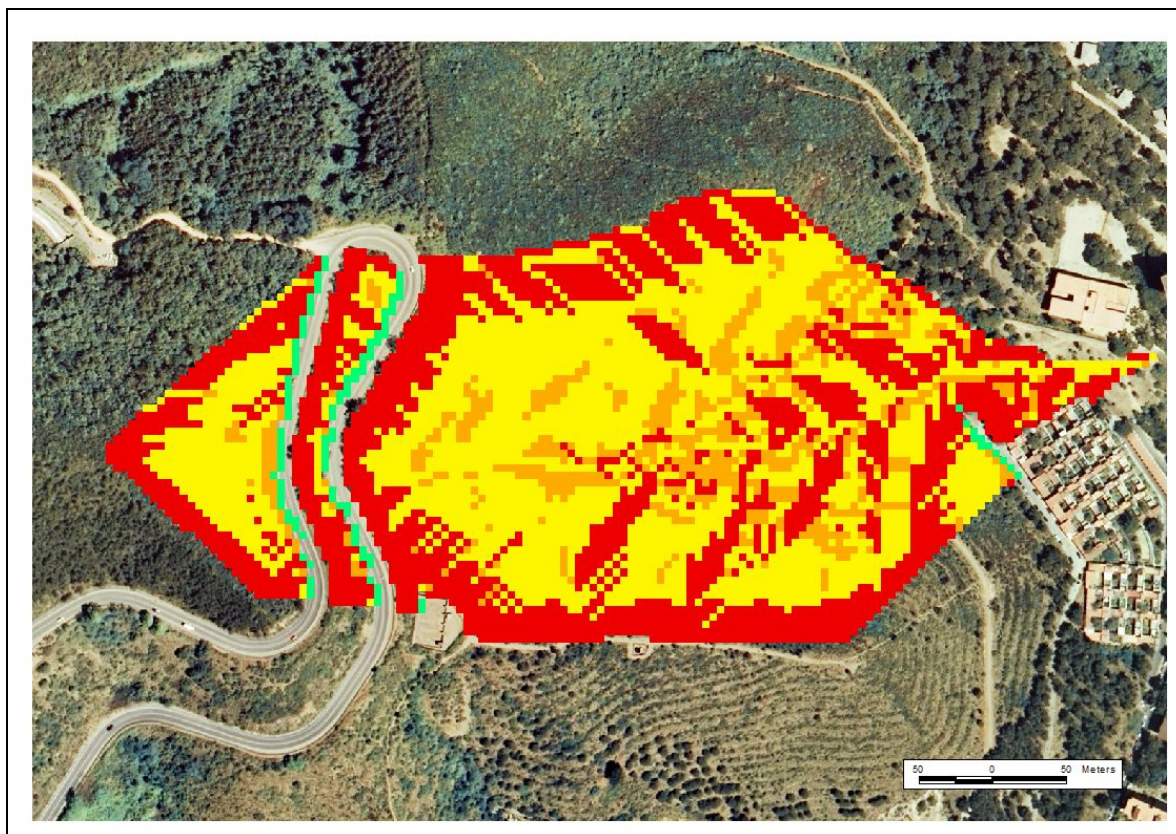
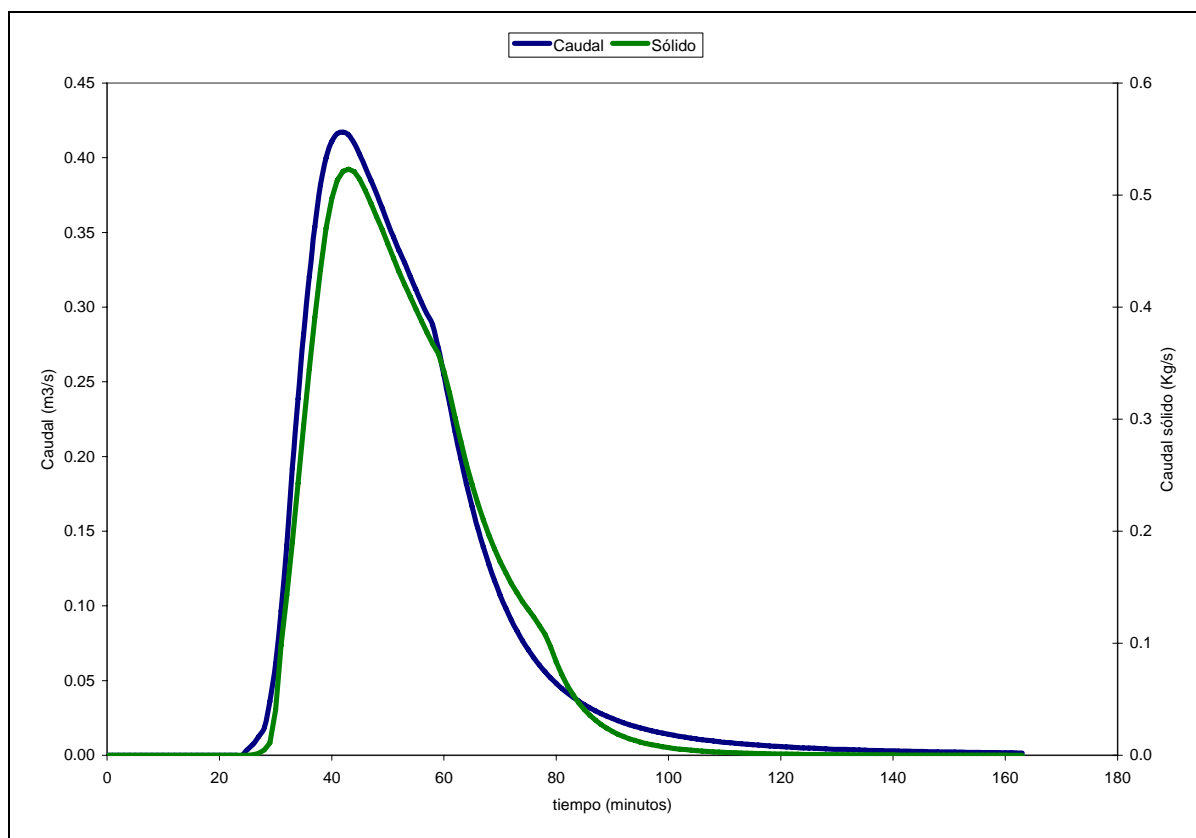


Gráfico 48: Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Montbau para T5 años.

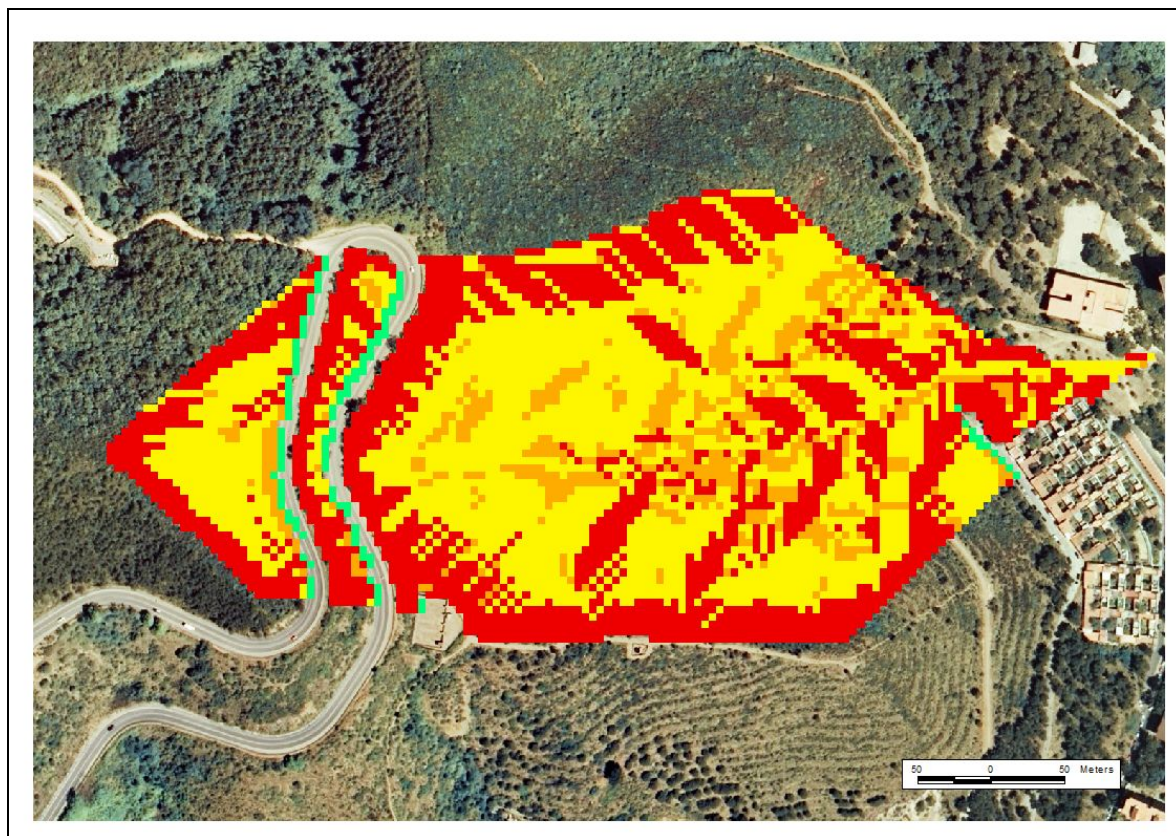




**Imagen 9:** Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T5. Cuenca Montbau



**Gráfico 49:** Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Montbau para T10 años.



**Imagen 10:** Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T10. Cuenca Montbau

	Q punta (m <sup>3</sup> /s)	t punta (min)	V agua (m <sup>3</sup> )	Qs punta (Kg/s)	t punta (min)	M sólido (kg)	V sólido (m <sup>3</sup> )	C media (kg/m <sup>3</sup> )	C max (kg/m <sup>3</sup> )
T2	0.15	59	306.6	0.17	54	353.5	0.18	0.72	1.11
T5	0.42	42	787.6	0.52	43	981.4	0.49	0.72	1.93
T10	0.69	37	1221.7	1.03	37.5	1685.8	0.84	0.78	1.9

**Tabla 46:** Esquematización de resultados de la cuenca Montbau. (Caudal punta, tiempo al caudal punta, volumen de agua vertido por la cuenca, caudal sólido punta, tiempo al caudal sólido punta, cantidad de sólido vertido por la cuenca, concentración media y máxima del flujo en el punto de desagüe).

Cabe destacar que para el caso representado por la lluvia de dos años de periodo de retorno, el caudal sólido punta se adelanta 5 minutos al caudal punta. En los otros dos casos el caudal sólido máximo se retrasa respecto al máximo caudal; aunque tienden a estar ambos máximos más próximos en el tiempo. Para calcular el volumen de sólido vertido por la cuenca se ha utilizado una densidad media de 2 toneladas/m<sup>3</sup>. La contribución por hectárea de sólido vertido en la cuenca Montbau es de: 25.25 Kg/ha, 70.1 Kg/ha y 130.4 Kg/ha para T2, T5 y T10 respectivamente. Para la lluvia T2 se deposita el 88% del material desprendido; para T5 el 83.5% y para T10 el 79.5%.

Los mapas que relacionan la deposición y el desprendimiento en la cuenca Montbau muestran un comportamiento idéntico para los tres periodos de retorno. En ellos se observa que en las zonas elevadas de la cuenca se produce únicamente desprendimiento; en las zonas impermeables (carretera, zona urbana) se presenta solo deposición. En las zonas intermedias y bajas (topográficamente hablando) se presentan ambos procesos.



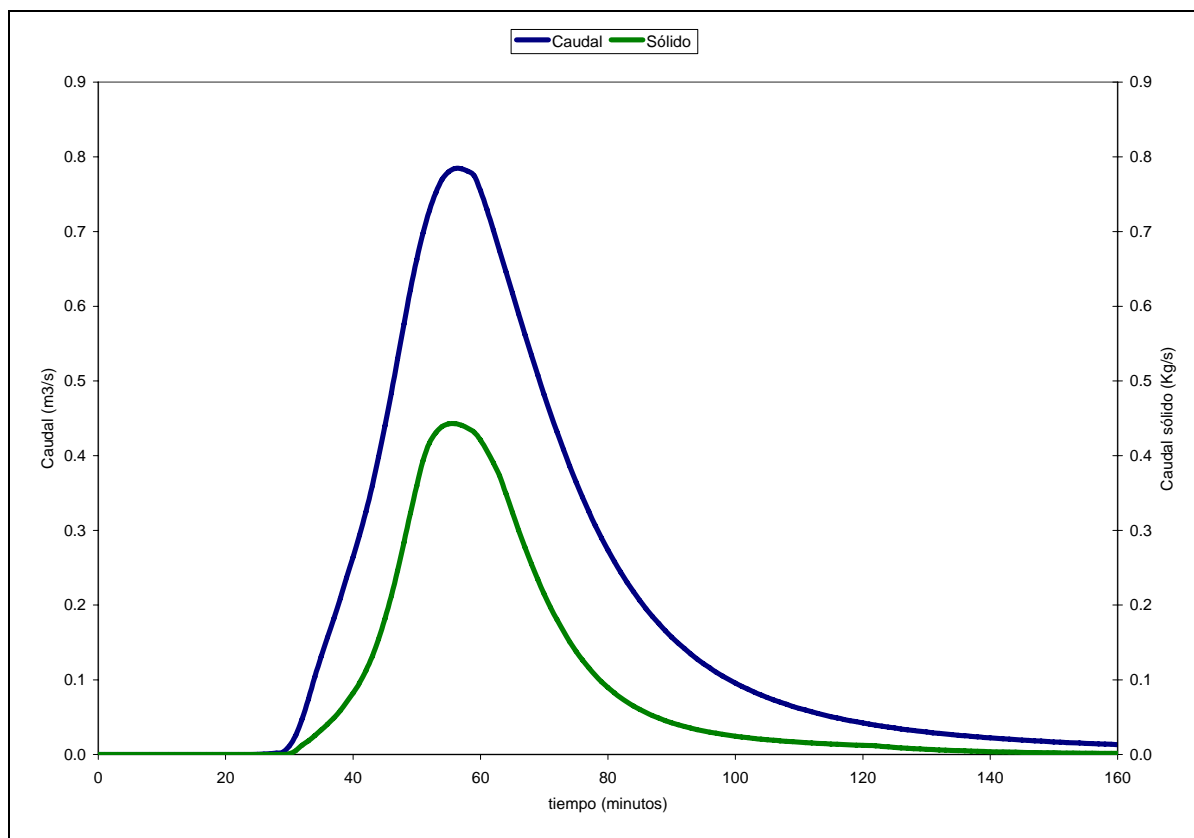


Gráfico 50: Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T2 años.

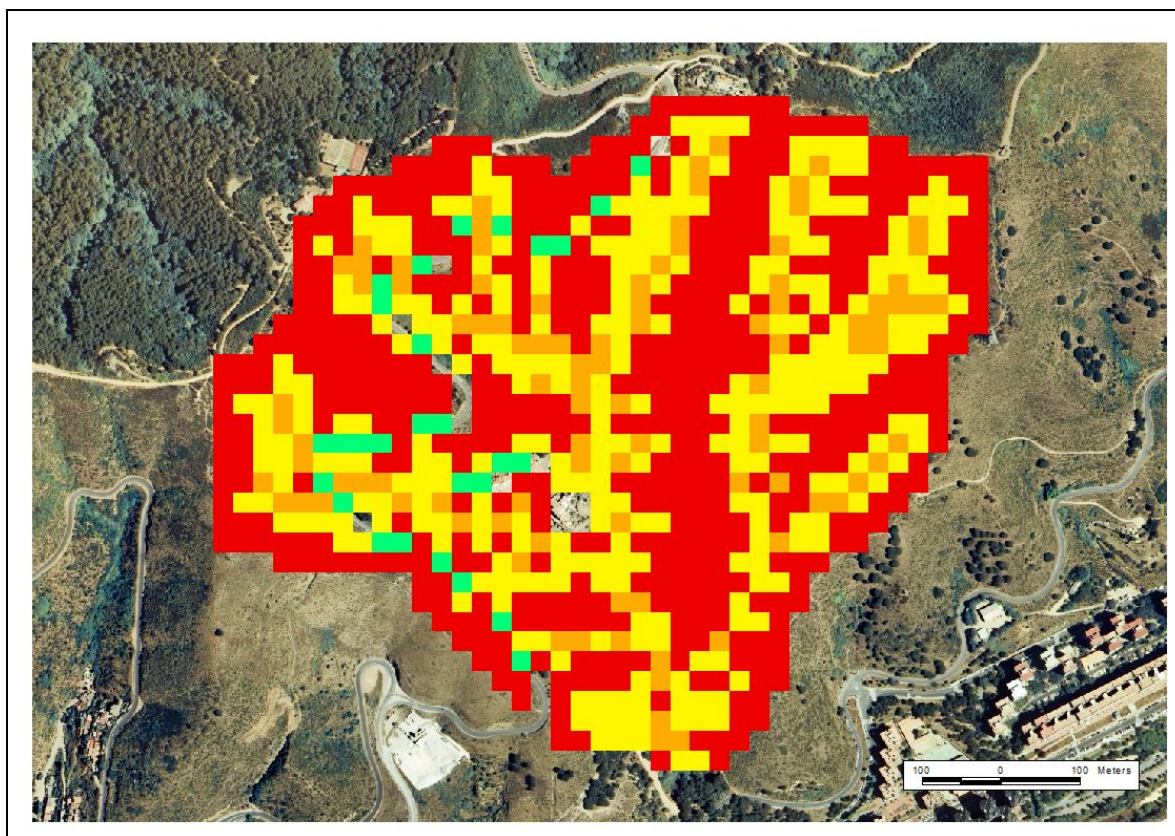


Imagen 11: Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T2. Cuenca Masdeu

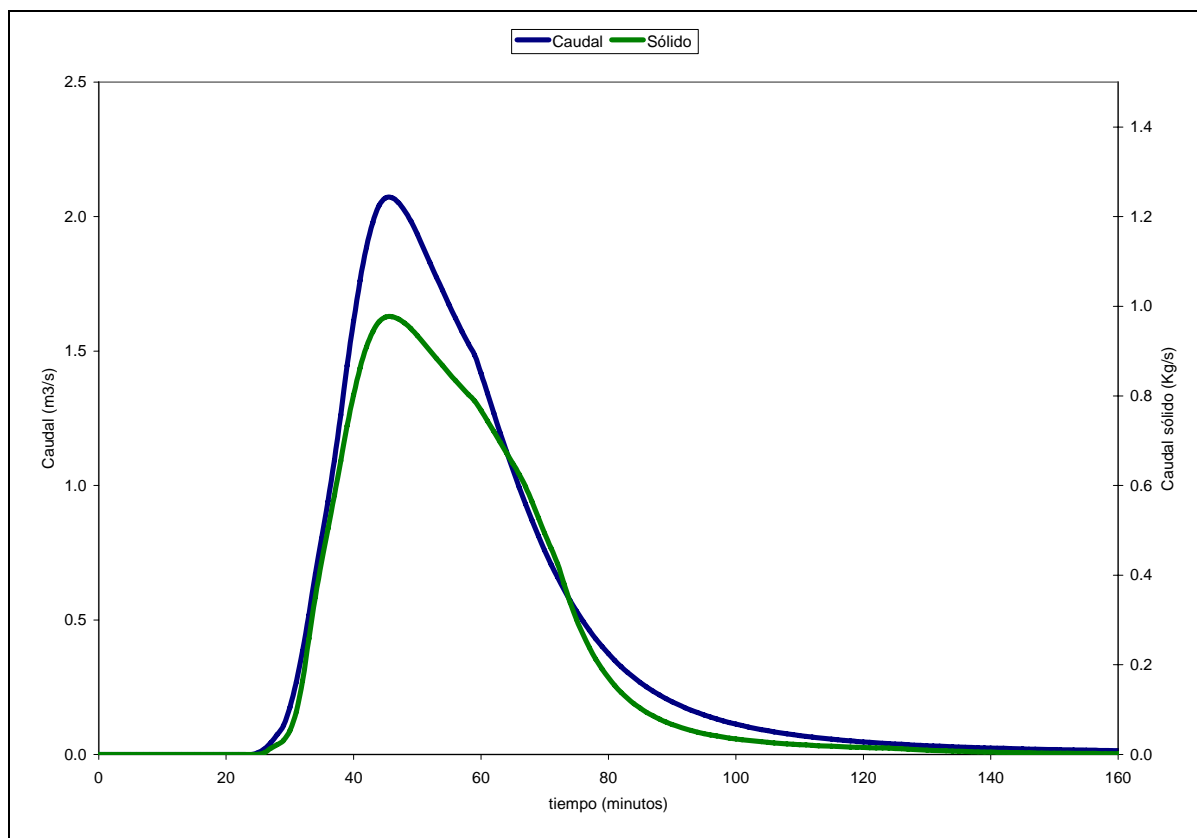


Gráfico 51: Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T5 años.

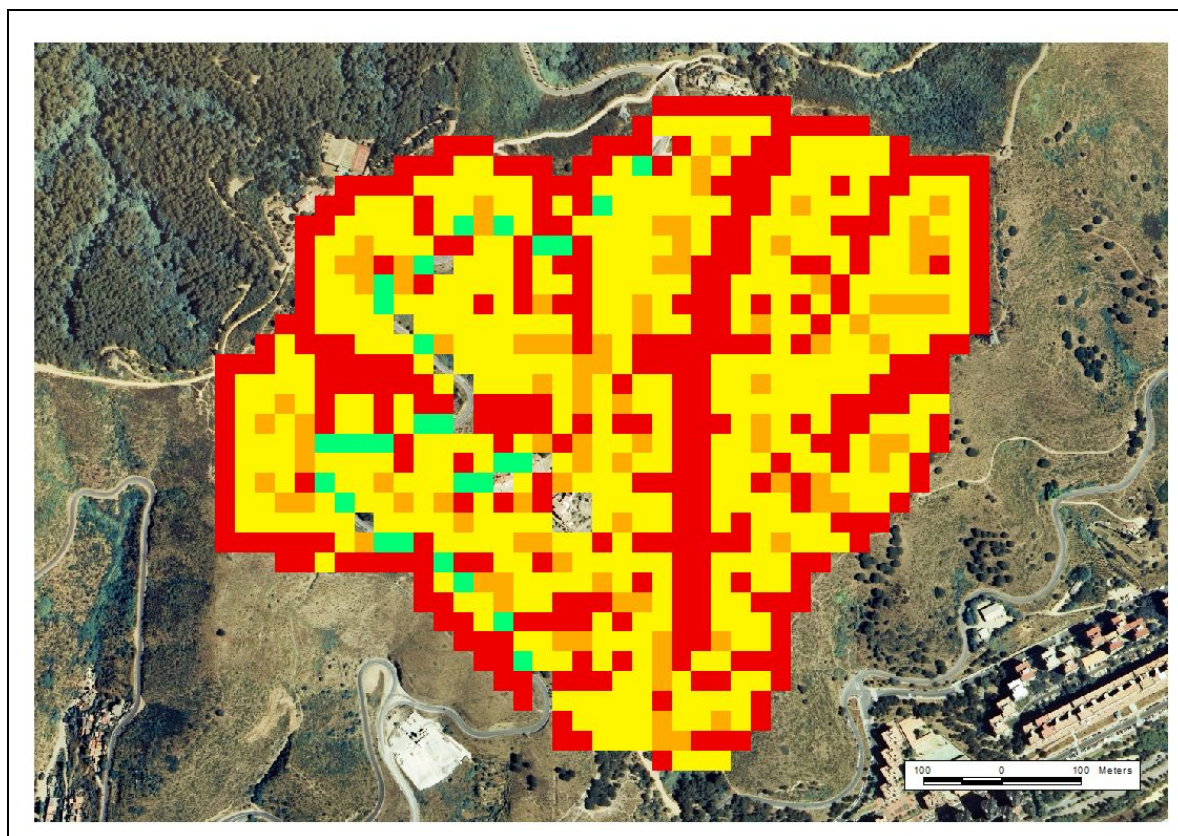
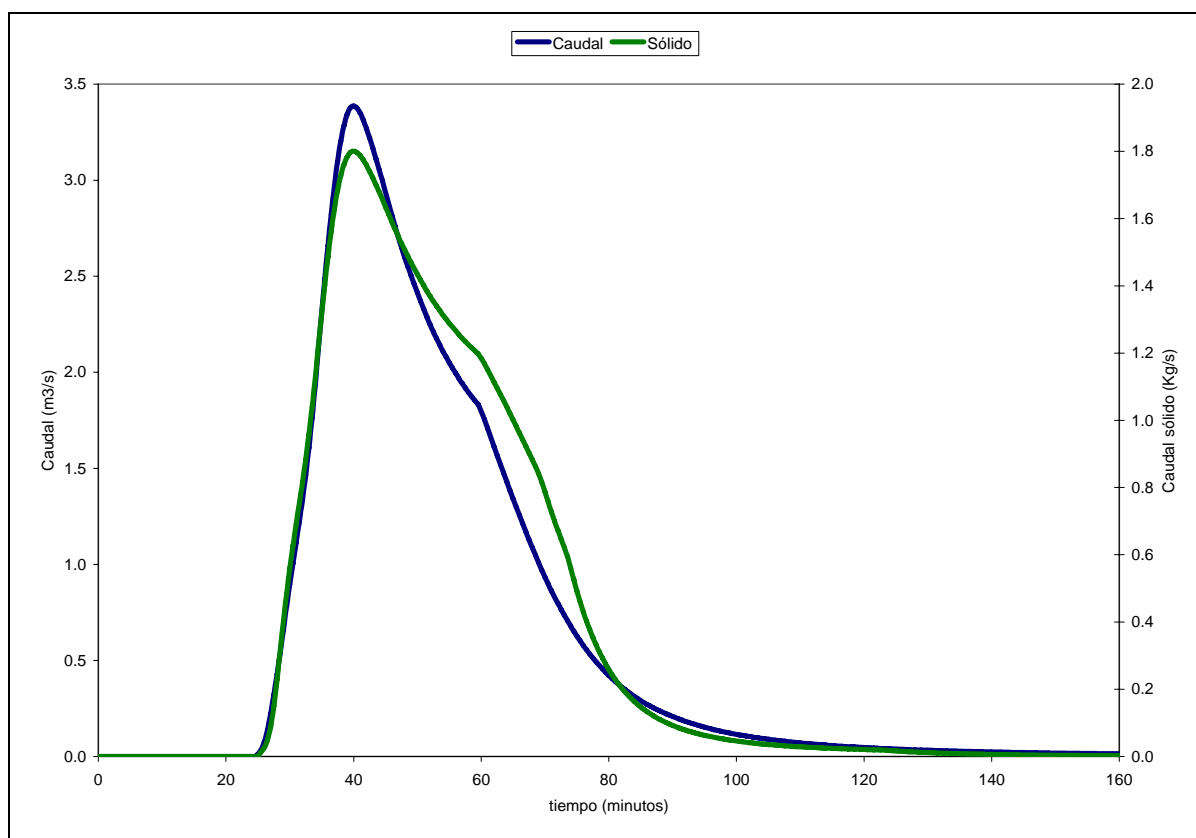
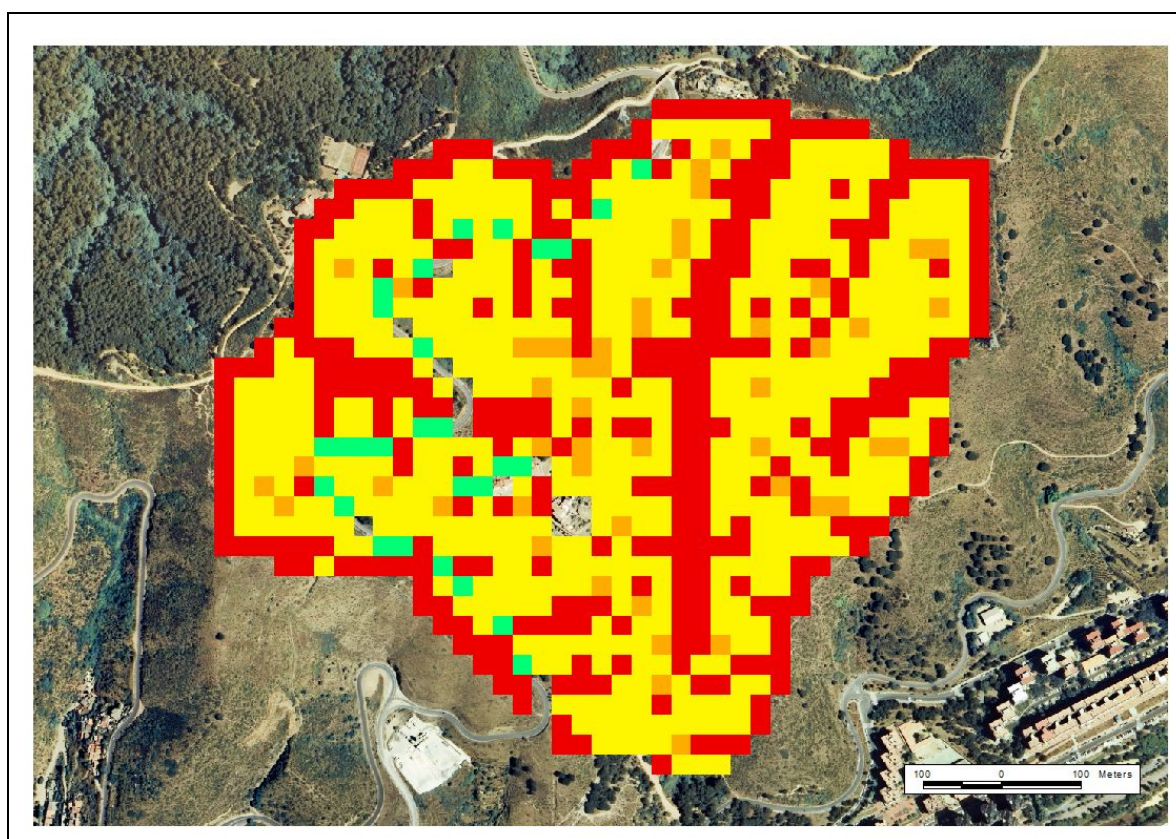


Imagen 12: Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T5. Cuenca Masdeu





**Gráfico 52:** Hidrograma y sedigrama de salida en la salida de la cuenca Masdeu para T10 años.



**Imagen 13:** Relación deposición/desprendimiento para la lluvia de diseño T10. Cuenca Masdeu

	Q punta (m <sup>3</sup> /s)	t punta (min)	V agua (m <sup>3</sup> )	Qs punta (Kg/s)	t punta (min)	M sólido (kg)	V sólido (m <sup>3</sup> )	C media (kg/m <sup>3</sup> )	C max (kg/m <sup>3</sup> )
T2	0.78	56	1732.1	0.44	56	763.3	0.38	0.29	0.57
T5	2.07	46	4078.0	0.98	46	2044.4	1.02	0.36	0.65
T10	3.39	40	6110.3	1.80	40	3672.9	1.84	0.38	0.85

**Gráfico 53:** Esquematación de resultados de la cuenca Masdeu. (Caudal punta, tiempo al caudal punta, volumen de agua vertido por la cuenca, caudal sólido punta, tiempo al caudal sólido punta, cantidad de sólido vertido por la cuenca, concentración media y máxima del flujo en el punto de desagüe).

A diferencia de lo ocurrido en la cuenca Montbau, en este caso el pico del caudal sólido siempre coincide con el pico del caudal líquido. La contribución por hectárea de sólido vertido en la cuenca Masdeu es de: 13.16 Kg/ha, 35,25 Kg/ha y 63.32 Kg/ha para T2, T5 y T10 años de periodo de retorno respectivamente. Para la lluvia T2 se deposita el 51,6% del material desprendido, para T5 el 33.8% y para T10 el 27.5%.

Las relaciones deposición – desprendimiento muestran comportamientos similares para todos los periodos de retorno. En líneas generales se produce solamente deposición de material en las zonas impermeables (carretera, edificios); en las zonas elevadas topográficamente se produce mayoritariamente erosión mientras que en las zonas intermedias y en los alrededores del punto de desagüe se producen ambos fenómenos.

Cabe destacar que la lluvia de T2 años (Imagen 11) presenta mayor superficie donde solo se produce erosión; mientras que en T5 y T10 hay un incremento de las áreas donde se producen ambos fenómenos. Este hecho se explica por la mayor cantidad de sólido desprendido en los periodos de retorno mayores, que provoca un incremento de la deposición debido a que la competencia para transportar sedimentos del caudal de T2 es pequeña. Concretamente para T2 se desprenden 1580 Kg. y depositan 819; para T5 y T10 se desprenden 3169 y 5300 kg. y se depositan 1070 y 1457 Kg. respectivamente

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un modelo que cuantifica la producción de sedimento a escala temporal de eventos de precipitación en pequeñas cuencas de cabecera de redes urbanas de drenaje. A partir de la resolución de la hidrología mediante el empleo de la aproximación de onda cinemática, el modelo determina el cálculo erosivo mediante la resolución de una ecuación de continuidad de la masa de sedimento. Como principales conclusiones obtenidas del estudio se pueden citar las siguientes:

- En referencia al mecanismo del desprendimiento se puede decir que el desprendimiento por impacto de las gotas de lluvia es despreciable. La mayor parte de la erosión de partículas sólidas se genera por acción del flujo hidráulico. En referencia a las zonas donde se produce el desprendimiento, el mayor porcentaje se produce en los regueros.
- El parámetro que controla de forma más directa la cantidad de suelo que sale de la cuenca es el parámetro de calibración del desprendimiento por acción del flujo. De manera menos directa, el valor de caudal sólido en el punto de desagüe se encuentra determinado por el parámetro de calibración de la capacidad de carga. El valor de ambos parámetros viene determinado por la cantidad real de sólido que expulsa la cuenca. Gracias a la calibración realizada en ambas cuencas, los valores del parámetro de calibración de la capacidad de carga que producen resultados aceptables suelen ser un orden de magnitud inferior al de desprendimiento por flujo.
- En referencia a la geometría de los regueros, cabe comentar que la variable geométrica que tiene mayor influencia en el cálculo erosivo es el ancho de los regueros. Por este motivo, para poder obtener predicciones ajustadas a la realidad; se hace necesario una descripción precisa de la red de regueros existente en la cuenca, lo cual se puede realizar con un pequeño esfuerzo.
- La formulación escogida para describir los procesos físicos actuantes en el fenómeno de la erosión hídrica (desprendimiento, transporte y deposición) genera valores de desprendimiento y de deposición del mismo orden de magnitud, y valores de sedimento expulsado por la cuenca de un orden o dos inferiores. Dicho con otras palabras, la mayor parte del material desprendido se deposita en el interior de las cuencas sin llegar al punto de desagüe. En la cuenca Montbau el porcentaje de material desprendido que posteriormente se deposita es mayor que en la cuenca Masdeu.
- La aportación de sedimentos de la cuenca Montbau se encuentra controlada en gran medida por la hidrología y la topografía. Aun siendo más pequeña que la cuenca Masdeu, en esta cuenca se produce más desprendimiento de material (debido principalmente a su mayor pendiente). Este hecho unido a que se generan caudales menores debido a su pequeña extensión provoca que se produzca mucha deposición y que la aportación de sedimento al exterior de la cuenca esté determinada por la capacidad de carga del flujo hidráulico, y no tanto por las características de parámetros como la erosionabilidad del suelo o la presencia de cubierta vegetal.
- La contribución por hectárea de sólido vertido al exterior de la cuenca Montbau es aproximadamente el doble que la contribución por hectárea de la cuenca Masdeu. Como se ha comentado en el punto anterior la cuenca Montbau presenta mayor pendiente y esto provoca que se produzca más desprendimiento de material sólido.
- El modelo y la metodología utilizados en este estudio permiten la estimación de la erosión hídrica para sucesos de lluvia aislados; principalmente calculan la cantidad de sólido vertido por una cuenca y su comportamiento temporal a lo largo del evento (obtención de sedigramas en el punto de desagüe de la cuenca). Con esta metodología se obtienen resultados que describen comportamientos lógicos de las variables calculadas de acuerdo con la naturaleza del fenómeno. Aunque la metodología del estudio es correcta, para poder realizar predicciones precisas y ajustadas a la realidad, se debe realizar la calibración del cálculo erosivo con datos reales.

- La estimación anual de producción de sedimentos que facilita la ecuación USLE se encuentra muy sobrevalorada. Como ya se ha comentado en el apartado 2.1.5, esto puede ser debido a que la USLE se concibió como una ecuación para estimar pérdidas de suelo en parcelas agrícolas y no tiene en cuenta los fenómenos de deposición y transporte que ocurren en el interior de una cuenca. Otras metodologías similares a la citada ecuación (método de Fournier y ecuación de Djorovic) también producen estimaciones sobrevaloradas respecto a los valores calculados con la metodología desarrollada en este estudio.
- Se debería considerar en futuros estudios la posibilidad de variar la erosionabilidad del suelo que haya sido erosionado y posteriormente depositado (imponiendo erosionabilidades más elevadas a los materiales depositados). Además se podría relacionar el coeficiente C con la rugosidad en las celdas que tienen flujo canalizado.

## BIBLIOGRAFÍA

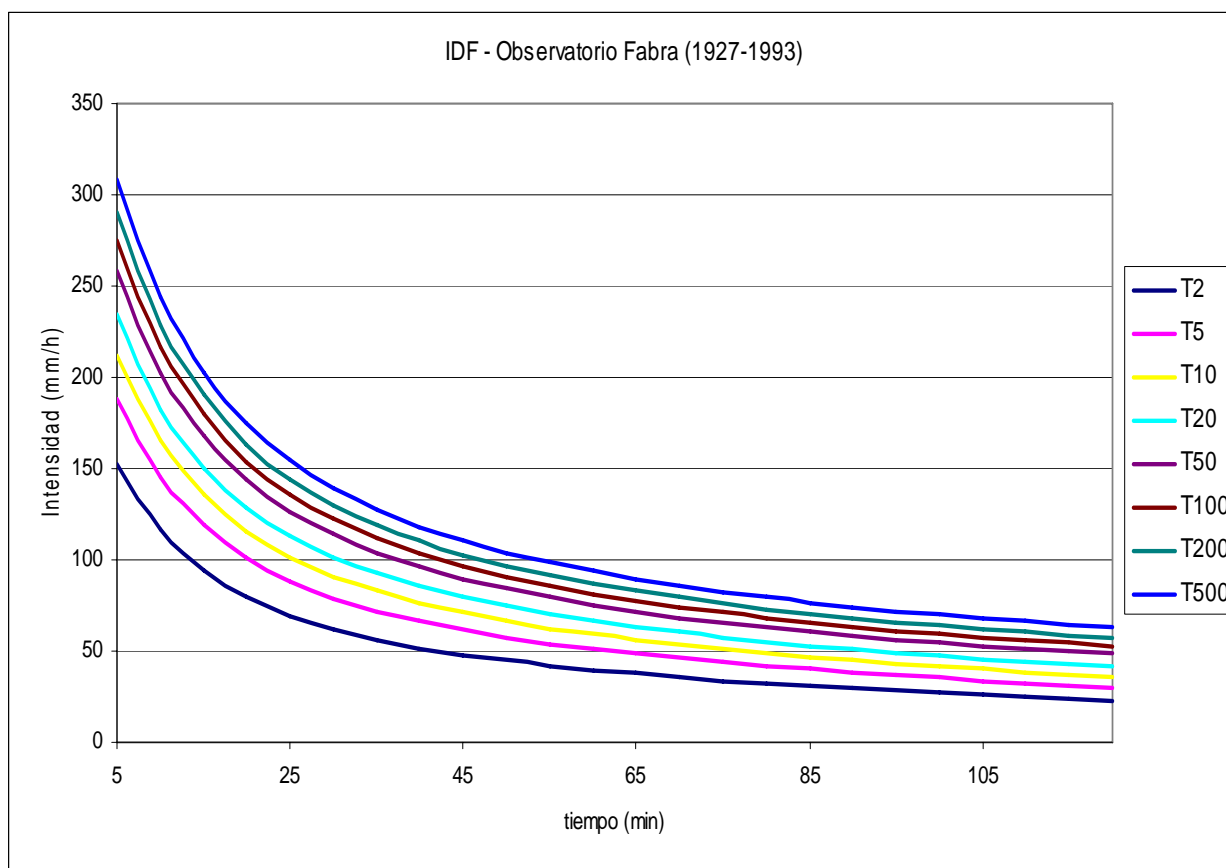
- Almorox, J., De Antonio, R., Saa, A., Cruz Díaz, M. y Gascó, J.M. (1994). "Métodos de estimación de la erosión hídrica". *Editorial Agrícola Española S.A.*
- Alturo Monné, R.A. (2000). "Aplicación de un SIG en el estudio hidrológico-forestal de las cuencas de la riera de la Esparra y el Torrente de Vilarrás". *Departament de Agricultura, ramaderia i pesca de la Generalitat de Catalunya*.
- Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A., López Bermúdez, F. y Hernández Laguna, E. (1999). "Óptimo de cobertura vegetal en relación a las pérdidas de suelo por erosión hídrica y las pérdidas de lluvia por interceptación" *Papeles de geografía*, 30 5-15.
- Chow, V.T. (1994). "Hidrología aplicada". *McGraw-Hill*.
- Cochrane, T.A. y Flanagan, D.C. (2005). "Effect of DEM resolutions in th runoff and soil loss predictions of the WEEP watershed model". *Transactions of the ASAE*, 48(1) 109-120.
- Cochrane, T.A. y Flanagan, D.C. (2003). "Representative Hillslope methods for applying the WEEP model with DEMs and GIS". *Transactions of the ASAE*, 46(4) 1041-1049.
- De Regoyos Sainz, M. "Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo GEOWEPP a dos pequeñas cuencas en Madrid". *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid*.
- Foster, G.R., Flanagan, D.C., Nearing, M.A., Lane, L.J., Risse, L.M. y Finkner, S.C. (1995). "Chapter 11. Hillslope erosion component. Water Erosion Prediction Project" *USDA-Agricultural Research Service National Soil Erosion Research Laboratory*.
- Foster, G.R. (1982). "Modelling the erosion processes. Hydrological modelling of small watersheds" *ASAE Monograph No. 5, C. T. Haan, H. Johnson, and D. L. Brakensiek, eds., American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich., 297-380*.
- García de Jalón, J., Rodríguez, J.I. y Vidal, J. (2005). "Aprenda MATLAB 7.0 como si estuviera en primero". *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid*.
- Gaur, M.L. y Marthur, B.S. (2003). "Modeling event-based temporal variability of flow resistance coefficient". *Journal of Hydrologic Engineering*, 8(5) 266-277.
- Han, C.T., Barfield, B.J. y Hayes, J.C. (1994). "Design hydrology and sedimentology for small watersheds". *Academic Press*.
- Jain, M.K., Kothiyari, U.C. y Ranga Raju, K.G. (2005). "GIS based distributed model for soil erosion and rate of sediment outflow from catchments". *Journal of Hydraulic Engineering*. 755-769.
- Jain, M.K., Kothiyari, U.C. y Ranga Raju, K.G. (2004). "A GIS based rainfall-runoff model". *Journal of Hydrology*, 299 107-135.
- Kothiyari, U.C., Tiwari, A.K. y Singh R. (1997). "Estimation of temporal variation of sediment yield from small catchments through the kinematic method". *Journal of Hydrology*, 203 39-57.
- Morgan, R.P., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D. y Styczen, M.E. (1998). "The European soil erosion model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments". *Earth Surface Processes and Landforms*, 23 527-544.

- Musgrave, G.W. (1947). "The quantitative evaluation of factors in water erosion, a first approximation". *Journal of Soil and water conservation*, 2(3) 133-138.
- Neistch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. y Williams, J.R. (2005). "Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation". *Texas agricultural experiment station, Blackland Research Center*.
- Raveendra, K.R. y Marthur, B.S. (2007). "Event-Based Soil Erosion of small watersheds". *Journal of Hydrologic Engineering*, 559-572.
- Rodríguez, M.F., Florentino, A, Gallardo, J. y De Antonio García, R. (2004). "Sistemas de información geográfica en la evaluación de la erosión hídrica en Badajoz - España aplicando la metodología USLE". *Agronomía Tropical*, 54(4) 391-409.
- Smith, M.B. y Brilly, M. (1992). "Automated grid element ordering for GIS-based overland flow modeling". *American Society for Photogrammetry and remote sensing*, 58(5) 579-585.
- Tayfur, G. (2002). "Modeling two-dimensional erosion process over infiltrating surfaces". *Journal of Hydrologic Engineering*, 252-259.
- Tayfur, G. (2001). "Modeling two-dimensional erosion process over infiltrating surfaces". *Journal of Hydrologic Engineering*, 259-262.
- Wicks, J.M. y Bathurst, J.C. (1996). "SHESED: a physically based, distributed erosion and sediment yield component for the SHE hydrological modelling system". *Journal of Hydrology*, 175 213-238.
- Wischmeier, W.H. (1978). "Agriculture Handbook: Prediction rainfall erosion losses - a guide to conservation planning". *United States, Department of Agriculture*.
- Zing, A.W. (1940). "Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff". *Agricultural Engineering*, 21.



## ANEJOS

### 1. LLUVIAS DE DISEÑO.



**Gráfico 54:** Curvas IDF extraídas de la información meteorológica recogida en el observatorio Fabra de Barcelona en el periodo 1927 – 1993 para 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200 y 500 años de periodo de retorno.

		Lluvias Brutas				Pérdidas acumuladas		Lluvias netas	
		T2							
		tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)
5	152.3	12.7	12.7	1.2	1.2	1.2	0.0	0.00	0.000
10	116.1	19.3	6.7	1.5	2.8	2.8	0.0	0.00	0.000
15	94.0	23.5	4.2	1.9	4.6	4.6	0.0	0.00	0.000
20	79.5	26.5	3.0	2.4	7.0	7.0	0.0	0.00	0.000
25	69.4	28.9	2.4	4.2	11.2	11.2	0.0	0.00	0.000
30	62.0	31.0	2.1	12.7	23.9	20.7	3.1	0.09	0.094
35	56.3	32.8	1.9	6.7	30.5	20.7	9.0	0.85	0.756
40	51.8	34.5	1.7	3.0	33.5	20.7	11.4	1.41	0.561
45	48.1	36.0	1.5	2.1	35.6	20.7	13.0	1.87	0.461
50	44.9	37.4	1.4	1.7	37.3	20.7	14.3	2.28	0.412
55	42.2	38.6	1.2	1.4	38.6	20.7	15.3	2.65	0.364

Estudio de la carga sólida de entrada en una red de alcantarillado urbana procedente de las cuencas de cabecera

60	39.7	39.7	1.1	1.1	39.7	20.7	16.1	2.96	0.308
<b>T5</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	188.2	15.7	15.7	1.6	1.6	1.6	0.0	0.00	0.0000
10	145.2	24.2	8.5	2.0	3.6	3.6	0.0	0.00	0.0000
15	118.6	29.6	5.4	2.4	6.0	6.0	0.0	0.00	0.0000
20	100.9	33.6	4.0	3.2	9.2	9.2	0.0	0.00	0.0000
25	88.4	36.8	3.2	5.4	14.7	14.7	0.0	0.00	0.0000
30	79.1	39.5	2.7	15.7	30.4	20.7	8.8	0.82	0.8239
35	71.9	42.0	2.4	8.5	38.9	20.7	15.5	2.71	1.8882
40	66.2	44.1	2.2	4.0	42.9	20.7	18.3	3.90	1.1877
45	61.5	46.1	2.0	2.7	45.6	20.7	20.1	4.82	0.9168
50	57.5	47.9	1.8	2.2	47.8	20.7	21.5	5.60	0.7867
55	54.1	49.6	1.6	1.8	49.6	20.7	22.6	6.29	0.6845
60	51.1	51.1	1.5	1.5	51.1	20.7	23.5	6.87	0.5865
<b>T10</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	212.4	17.7	17.7	2.1	2.1	2.1	0.0	0.00	0.0000
10	164.9	27.5	9.8	2.6	4.7	4.7	0.0	0.00	0.0000
15	135.3	33.8	6.3	3.2	7.9	7.9	0.0	0.00	0.0000
20	115.4	38.5	4.7	4.7	12.6	12.6	0.0	0.00	0.0000
25	101.3	42.2	3.8	9.8	22.3	20.7	1.6	0.03	0.0256
30	90.9	45.4	3.2	17.7	40.0	20.7	16.3	3.04	3.0156
35	82.8	48.3	2.8	6.3	46.4	20.7	20.6	5.10	2.0561
40	76.3	50.8	2.6	3.8	50.1	20.7	22.9	6.51	1.4090
45	70.9	53.2	2.3	2.8	53.0	20.7	24.6	7.66	1.1525
50	66.4	55.3	2.1	2.3	55.3	20.7	25.9	8.66	0.9993
55	62.5	57.3	2.0	2.0	57.3	20.7	27.0	9.53	0.8714
60	59.1	59.1	1.8	1.8	59.1	20.7	28.0	10.35	0.8245
<b>T20</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	234.0	19.5	19.5	2.5	2.5	2.5	0.0	0.00	0.0000
10	182.5	30.4	10.9	2.9	5.4	5.4	0.0	0.00	0.0000
15	150.2	37.6	7.1	3.6	9.0	9.0	0.0	0.00	0.0000
20	128.5	42.8	5.3	5.3	14.3	14.3	0.0	0.00	0.0000
25	113.1	47.1	4.3	10.9	25.2	20.7	4.3	0.19	0.1899
30	101.5	50.8	3.6	19.5	44.7	20.7	19.5	4.52	4.3310
35	92.6	54.0	3.2	7.1	51.9	20.7	24.0	7.21	2.6849
40	85.4	56.9	2.9	4.3	56.1	20.7	26.4	9.03	1.8209
45	79.5	59.6	2.7	3.2	59.4	20.7	28.2	10.51	1.4787
50	74.5	62.0	2.5	2.7	62.0	20.7	29.6	11.79	1.2814
55	70.2	64.3	2.3	2.3	64.3	20.7	30.7	12.91	1.1261
60	66.4	66.4	2.1	2.1	66.4	20.7	31.7	13.98	1.0712
<b>T50</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	258.9	21.6	21.6	2.9	2.9	2.9	0.0	0.00	0.0000
10	202.9	33.8	12.2	3.4	6.2	6.2	0.0	0.00	0.0000
15	167.7	41.9	8.1	4.2	10.4	10.4	0.0	0.00	0.0000
20	143.8	47.9	6.0	6.0	16.4	16.4	0.0	0.00	0.0000

25	126.8	52.8	4.9	12.2	28.7	20.7	7.4	0.57	0.5718
30	114.0	57.0	4.2	21.6	50.3	20.7	23.0	6.56	5.9880
35	104.1	60.7	3.7	8.1	58.4	20.7	27.6	10.03	3.4746
40	96.1	64.1	3.4	4.9	63.2	20.7	30.2	12.38	2.3423
45	89.6	67.2	3.1	3.7	67.0	20.7	32.0	14.27	1.8950
50	84.1	70.1	2.9	3.1	70.1	20.7	33.4	15.92	1.6458
55	79.3	72.7	2.7	2.7	72.7	20.7	34.6	17.38	1.4604
60	75.2	75.2	2.5	2.5	75.2	20.7	35.7	18.78	1.3980
<b>T100</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	275.6	23.0	23.0	3.2	3.2	3.2	0.0	0.00	0.0000
10	216.6	36.1	13.1	3.7	6.8	6.8	0.0	0.00	0.0000
15	179.4	44.8	8.7	4.6	11.4	11.4	0.0	0.00	0.0000
20	154.1	51.4	6.5	6.5	17.9	17.9	0.0	0.00	0.0000
25	136.0	56.7	5.3	13.1	31.1	20.7	9.4	0.94	0.9422
30	122.5	61.2	4.6	23.0	54.0	20.7	25.2	8.11	7.1659
35	111.9	65.3	4.1	8.7	62.8	20.7	29.9	12.14	4.0352
40	103.5	69.0	3.7	5.3	68.1	20.7	32.5	14.86	2.7152
45	96.5	72.4	3.4	4.1	72.1	20.7	34.4	17.05	2.1952
50	90.6	75.5	3.2	3.4	75.5	20.7	35.9	18.96	1.9113
55	85.6	78.5	2.9	2.9	78.5	20.7	37.1	20.67	1.7072
60	81.2	81.2	2.8	2.8	81.2	20.7	38.2	22.31	1.6407
<b>T200</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	290.8	24.2	24.2	3.4	3.4	3.4	0.0	0.00	0.0000
10	229.1	38.2	14.0	4.0	7.4	7.4	0.0	0.00	0.0000
15	190.0	47.5	9.3	4.9	12.3	12.3	0.0	0.00	0.0000
20	163.5	54.5	7.0	7.0	19.3	19.3	0.0	0.00	0.0000
25	144.5	60.2	5.7	14.0	33.3	20.7	11.2	1.36	1.3589
30	130.2	65.1	4.9	24.2	57.5	20.7	27.2	9.64	8.2794
35	119.1	69.5	4.4	9.3	66.8	20.7	31.9	14.20	4.5649
40	110.2	73.5	4.0	5.7	72.5	20.7	34.6	17.27	3.0697
45	102.9	77.2	3.7	4.4	76.9	20.7	36.4	19.76	2.4825
50	96.7	80.6	3.4	3.7	80.6	20.7	38.0	21.92	2.1674
55	91.4	83.8	3.2	3.2	83.8	20.7	39.2	23.87	1.9475
60	86.8	86.8	3.0	3.0	86.8	20.7	40.4	25.75	1.8781
<b>T500</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	308.9	25.7	25.7	3.8	3.8	3.8	0.0	0.00	0.0000
10	244.0	40.7	14.9	4.4	8.1	8.1	0.0	0.00	0.0000
15	202.9	50.7	10.0	5.3	13.5	13.5	0.0	0.00	0.0000
20	174.9	58.3	7.6	7.6	21.0	20.7	0.3	0.00	0.0010
25	154.7	64.5	6.2	14.9	36.0	20.7	13.3	1.96	1.9565
30	139.6	69.8	5.3	25.7	61.7	20.7	29.4	11.62	9.6613
35	127.8	74.6	4.8	10.0	71.8	20.7	34.2	16.84	5.2225
40	118.4	78.9	4.4	6.2	77.9	20.7	36.9	20.35	3.5125
45	110.6	83.0	4.0	4.8	82.7	20.7	38.8	23.20	2.8438
50	104.1	86.7	3.8	4.0	86.7	20.7	40.3	25.69	2.4921
55	98.5	90.3	3.6	3.6	90.3	20.7	41.6	27.94	2.2548
60	93.7	93.7	3.4	3.4	93.7	20.7	42.8	30.13	2.1829

**Tabla 47:** Lluvias brutas de diseño, pérdidas acumuladas y lluvias netas de diseño de la cuenca Masdeu.

		Lluvias Brutas				Pérdidas acumuladas		Lluvias netas	
T2									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	152.3	12.7	12.7	1.2	1.2	1.2	0.0	0.00	0.000
10	116.1	19.3	6.7	1.5	2.8	2.8	0.0	0.00	0.000
15	94.0	23.5	4.2	1.9	4.6	4.6	0.0	0.00	0.000
20	79.5	26.5	3.0	2.4	7.0	7.0	0.0	0.00	0.000
25	69.4	28.9	2.4	4.2	11.2	11.2	0.0	0.00	0.000
30	62.0	31.0	2.1	12.7	23.9	22.8	1.0	0.01	0.009
35	56.3	32.8	1.9	6.7	30.5	22.8	7.2	0.48	0.476
40	51.8	34.5	1.7	3.0	33.5	22.8	9.8	0.91	0.430
45	48.1	36.0	1.5	2.1	35.6	22.8	11.5	1.28	0.369
50	44.9	37.4	1.4	1.7	37.3	22.8	12.8	1.62	0.338
55	42.2	38.6	1.2	1.4	38.6	22.8	13.9	1.92	0.303
60	39.7	39.7	1.1	1.1	39.7	22.8	14.7	2.18	0.259

T5									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	188.2	15.7	15.7	1.6	1.6	1.6	0.0	0.00	0.0000
10	145.2	24.2	8.5	2.0	3.6	3.6	0.0	0.00	0.0000
15	118.6	29.6	5.4	2.4	6.0	6.0	0.0	0.00	0.0000
20	100.9	33.6	4.0	3.2	9.2	9.2	0.0	0.00	0.0000
25	88.4	36.8	3.2	5.4	14.7	14.7	0.0	0.00	0.0000
30	79.1	39.5	2.7	15.7	30.4	22.8	7.1	0.47	0.4662
35	71.9	42.0	2.4	8.5	38.9	22.8	14.1	1.98	1.5119
40	66.2	44.1	2.2	4.0	42.9	22.8	17.0	2.99	1.0095
45	61.5	46.1	2.0	2.7	45.6	22.8	19.0	3.78	0.7942
50	57.5	47.9	1.8	2.2	47.8	22.8	20.5	4.47	0.6889
55	54.1	49.6	1.6	1.8	49.6	22.8	21.7	5.07	0.6040
60	51.1	51.1	1.5	1.5	51.1	22.8	22.6	5.60	0.5204

T10									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	212.4	17.7	17.7	2.1	2.1	2.1	0.0	0.00	0.0000
10	164.9	27.5	9.8	2.6	4.7	4.7	0.0	0.00	0.0000
15	135.3	33.8	6.3	3.2	7.9	7.9	0.0	0.00	0.0000
20	115.4	38.5	4.7	4.7	12.6	12.6	0.0	0.00	0.0000
25	101.3	42.2	3.8	9.8	22.3	22.3	0.0	0.00	0.0000
30	90.9	45.4	3.2	17.7	40.0	22.8	15.0	2.26	2.2551
35	82.8	48.3	2.8	6.3	46.4	22.8	19.5	4.03	1.7717
40	76.3	50.8	2.6	3.8	50.1	22.8	22.0	5.27	1.2414
45	70.9	53.2	2.3	2.8	53.0	22.8	23.8	6.29	1.0264
50	66.4	55.3	2.1	2.3	55.3	22.8	25.3	7.19	0.8964
55	62.5	57.3	2.0	2.0	57.3	22.8	26.5	7.98	0.7857
60	59.1	59.1	1.8	1.8	59.1	22.8	27.5	8.72	0.7465

T20									
tiempo	Intensidad	Acumulada	Incremental	Centrada	Acumulada	Ia	Fa	Acumulada	Incremental

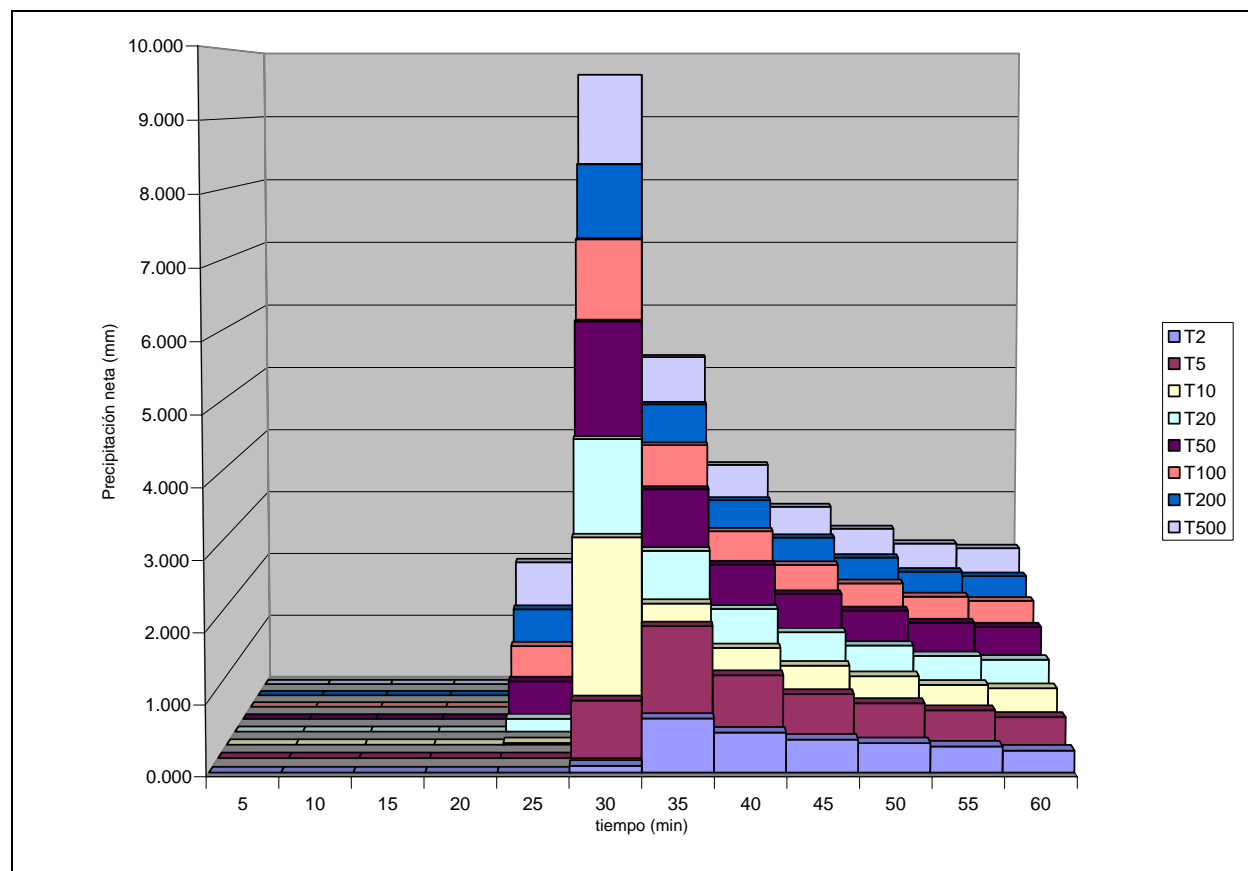
(min)	(mm/h)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
5	234.0	19.5	19.5	2.5	2.5	2.5	0.0	0.00	0.0000
10	182.5	30.4	10.9	2.9	5.4	5.4	0.0	0.00	0.0000
15	150.2	37.6	7.1	3.6	9.0	9.0	0.0	0.00	0.0000
20	128.5	42.8	5.3	5.3	14.3	14.3	0.0	0.00	0.0000
25	113.1	47.1	4.3	10.9	25.2	22.8	2.4	0.05	0.0495
30	101.5	50.8	3.6	19.5	44.7	22.8	18.4	3.52	3.4750
35	92.6	54.0	3.2	7.1	51.9	22.8	23.2	5.89	2.3657
40	85.4	56.9	2.9	4.3	56.1	22.8	25.8	7.52	1.6328
45	79.5	59.6	2.7	3.2	59.4	22.8	27.7	8.86	1.3378
50	74.5	62.0	2.5	2.7	62.0	22.8	29.2	10.03	1.1662
55	70.2	64.3	2.3	2.3	64.3	22.8	30.4	11.06	1.0293
60	66.4	66.4	2.1	2.1	66.4	22.8	31.5	12.04	0.9827
<b>T50</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	258.9	21.6	21.6	2.9	2.9	2.9	0.0	0.00	0.0000
10	202.9	33.8	12.2	3.4	6.2	6.2	0.0	0.00	0.0000
15	167.7	41.9	8.1	4.2	10.4	10.4	0.0	0.00	0.0000
20	143.8	47.9	6.0	6.0	16.4	16.4	0.0	0.00	0.0000
25	126.8	52.8	4.9	12.2	28.7	22.8	5.6	0.29	0.2860
30	114.0	57.0	4.2	21.6	50.3	22.8	22.1	5.32	5.0296
35	104.1	60.7	3.7	8.1	58.4	22.8	27.1	8.43	3.1180
40	96.1	64.1	3.4	4.9	63.2	22.8	29.8	10.57	2.1320
45	89.6	67.2	3.1	3.7	67.0	22.8	31.8	12.30	1.7377
50	84.1	70.1	2.9	3.1	70.1	22.8	33.4	13.82	1.5168
55	79.3	72.7	2.7	2.7	72.7	22.8	34.7	15.17	1.3511
60	75.2	75.2	2.5	2.5	75.2	22.8	35.9	16.47	1.2974
<b>T100</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	275.6	23.0	23.0	3.2	3.2	3.2	0.0	0.00	0.0000
10	216.6	36.1	13.1	3.7	6.8	6.8	0.0	0.00	0.0000
15	179.4	44.8	8.7	4.6	11.4	11.4	0.0	0.00	0.0000
20	154.1	51.4	6.5	6.5	17.9	17.9	0.0	0.00	0.0000
25	136.0	56.7	5.3	13.1	31.1	22.8	7.7	0.55	0.5541
30	122.5	61.2	4.6	23.0	54.0	22.8	24.5	6.70	6.1430
35	111.9	65.3	4.1	8.7	62.8	22.8	29.6	10.35	3.6553
40	103.5	69.0	3.7	5.3	68.1	22.8	32.4	12.84	2.4910
45	96.5	72.4	3.4	4.1	72.1	22.8	34.4	14.87	2.0276
50	90.6	75.5	3.2	3.4	75.5	22.8	36.1	16.64	1.7735
55	85.6	78.5	2.9	2.9	78.5	22.8	37.4	18.23	1.5898
60	81.2	81.2	2.8	2.8	81.2	22.8	38.6	19.77	1.5323
<b>T200</b>									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	la (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	290.8	24.2	24.2	3.4	3.4	3.4	0.0	0.00	0.0000
10	229.1	38.2	14.0	4.0	7.4	7.4	0.0	0.00	0.0000
15	190.0	47.5	9.3	4.9	12.3	12.3	0.0	0.00	0.0000
20	163.5	54.5	7.0	7.0	19.3	19.3	0.0	0.00	0.0000
25	144.5	60.2	5.7	14.0	33.3	22.8	9.6	0.87	0.8744
30	130.2	65.1	4.9	24.2	57.5	22.8	26.6	8.08	7.2008
35	119.1	69.5	4.4	9.3	66.8	22.8	31.8	12.24	4.1652

40	110.2	73.5	4.0	5.7	72.5	22.8	34.6	15.07	2.8336
45	102.9	77.2	3.7	4.4	76.9	22.8	36.7	17.38	2.3059
50	96.7	80.6	3.4	3.7	80.6	22.8	38.4	19.40	2.0220
55	91.4	83.8	3.2	3.2	83.8	22.8	39.7	21.22	1.8229
60	86.8	86.8	3.0	3.0	86.8	22.8	41.0	22.99	1.7628

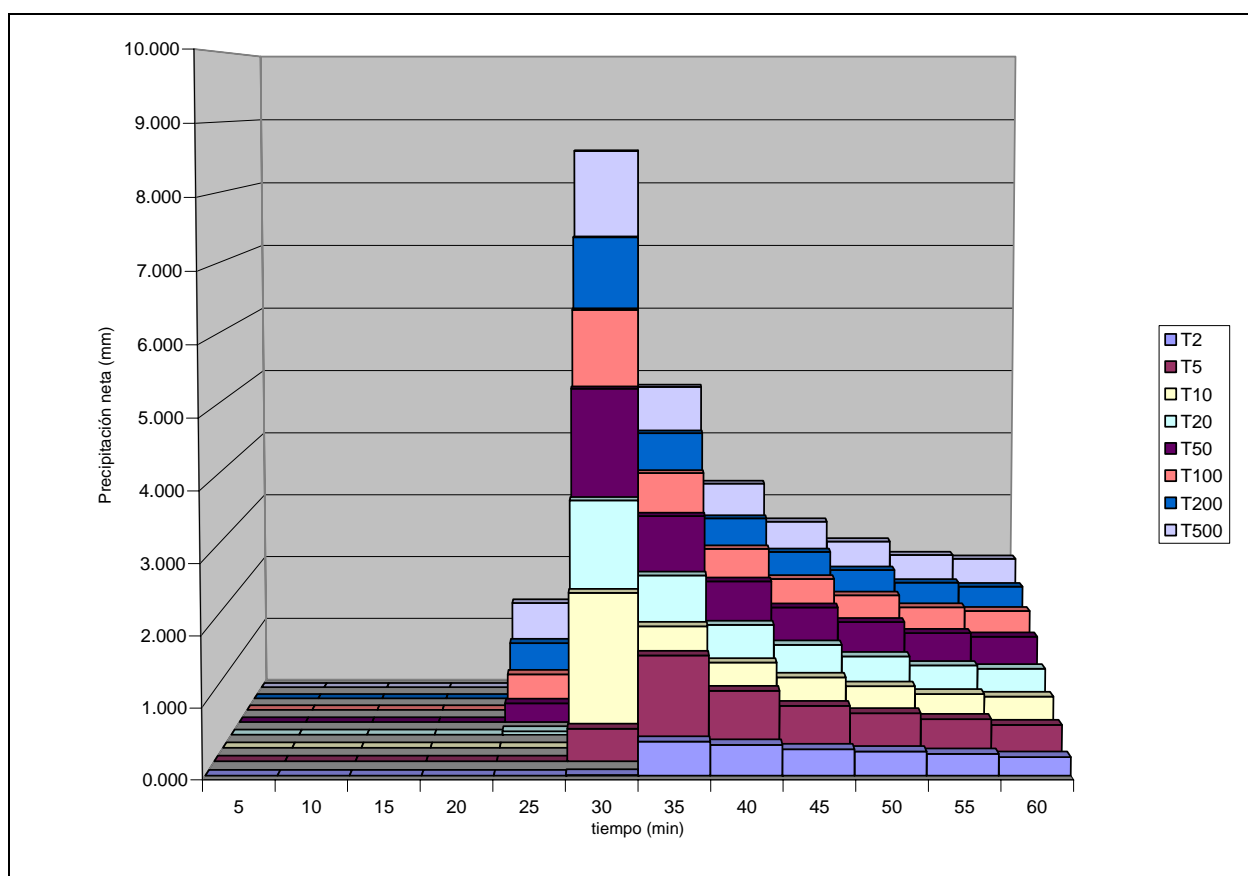
  

T500									
tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)	Centrada (mm)	Acumulada (mm)	Ia (mm)	Fa (mm)	Acumulada (mm)	Incremental (mm)
5	308.9	25.7	25.7	3.8	3.8	3.8	0.0	0.00	0.0000
10	244.0	40.7	14.9	4.4	8.1	8.1	0.0	0.00	0.0000
15	202.9	50.7	10.0	5.3	13.5	13.5	0.0	0.00	0.0000
20	174.9	58.3	7.6	7.6	21.0	21.0	0.0	0.00	0.0000
25	154.7	64.5	6.2	14.9	36.0	22.8	11.8	1.35	1.3540
30	139.6	69.8	5.3	25.7	61.7	22.8	29.0	9.87	8.5197
35	127.8	74.6	4.8	10.0	71.8	22.8	34.2	14.67	4.8006
40	118.4	78.9	4.4	6.2	77.9	22.8	37.2	17.94	3.2631
45	110.6	83.0	4.0	4.8	82.7	22.8	39.3	20.59	2.6571
50	104.1	86.7	3.8	4.0	86.7	22.8	41.0	22.93	2.3379
55	98.5	90.3	3.6	3.6	90.3	22.8	42.4	25.05	2.1219
60	93.7	93.7	3.4	3.4	93.7	22.8	43.7	27.11	2.0596

**Tabla 48:** Lluvias brutas de sieño, pérdidas acumuladas y lluvias netas de diseño de la cuenca Montbau.



**Gráfico 55:** Hietogramas de lluvia neta de diseño en función del periodo de retorno. Cuenca Masdeu.

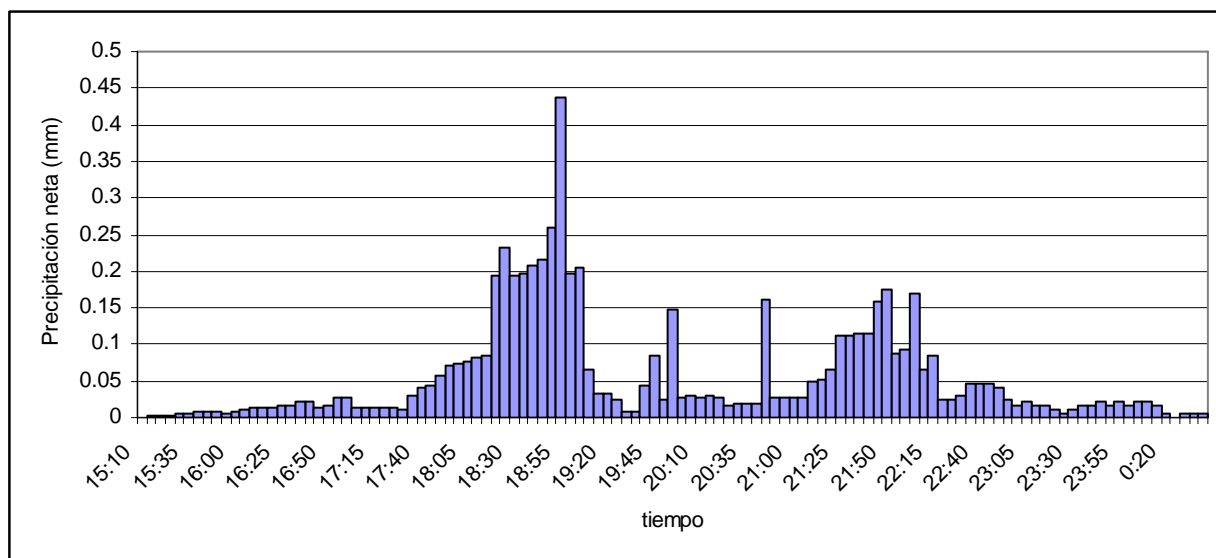


**Gráfico 56:** Hietogramas de lluvia neta de diseño en función del periodo de retorno. Cuenca Montbau.

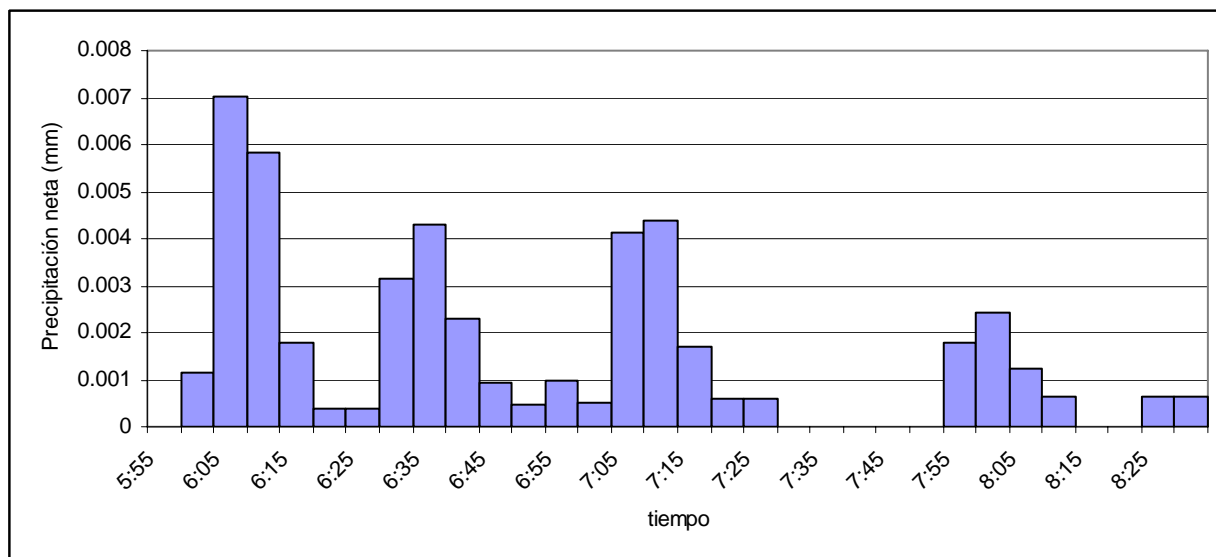




## 2. EPISODIOS DE LLUVIA NETA DE LA SERIE ANUAL



**Gráfico 57:** Episodio de lluvia neta 1 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



**Gráfico 58:** Episodio de lluvia neta 2 de la serie anual en la cuenca Masdeu.

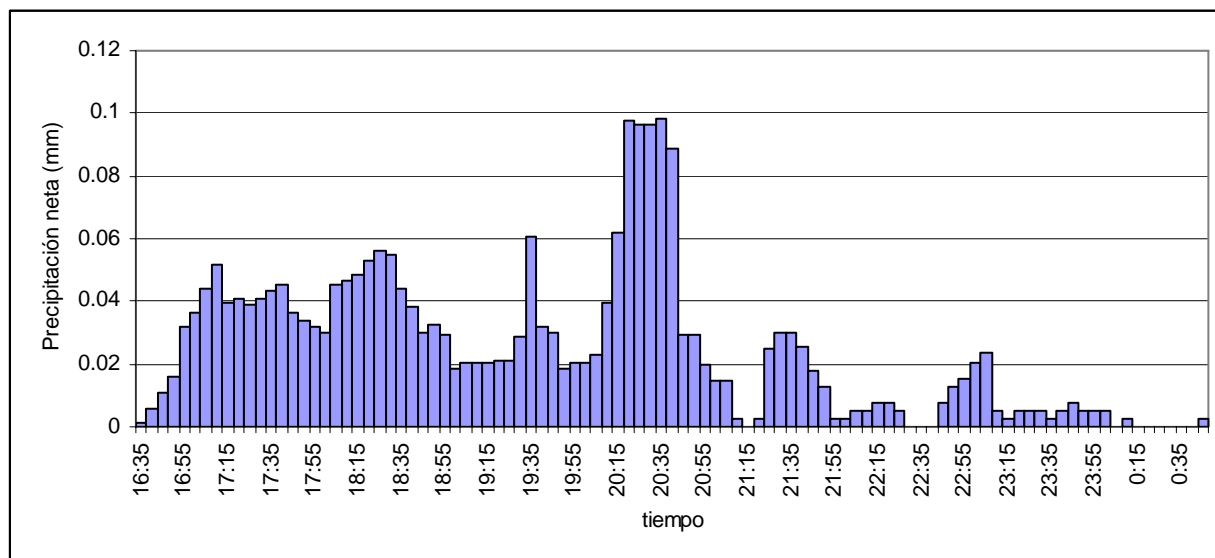


Gráfico 59: Episodio de lluvia neta 3 de la serie anual en la cuenca Masdeu.

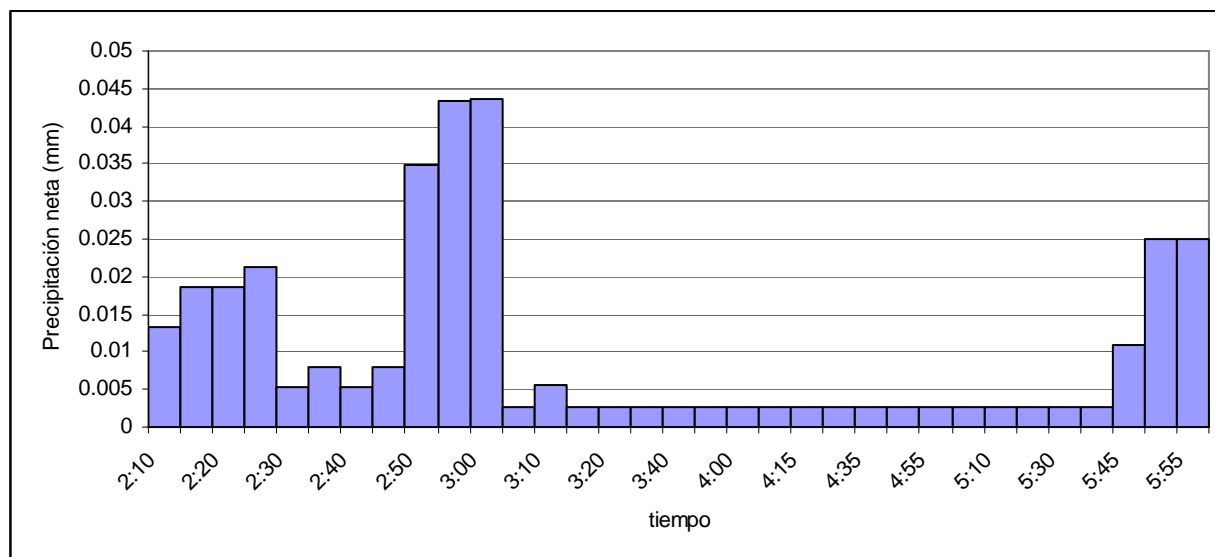


Gráfico 60: Episodio de lluvia neta 4 de la serie anual en la cuenca Masdeu.

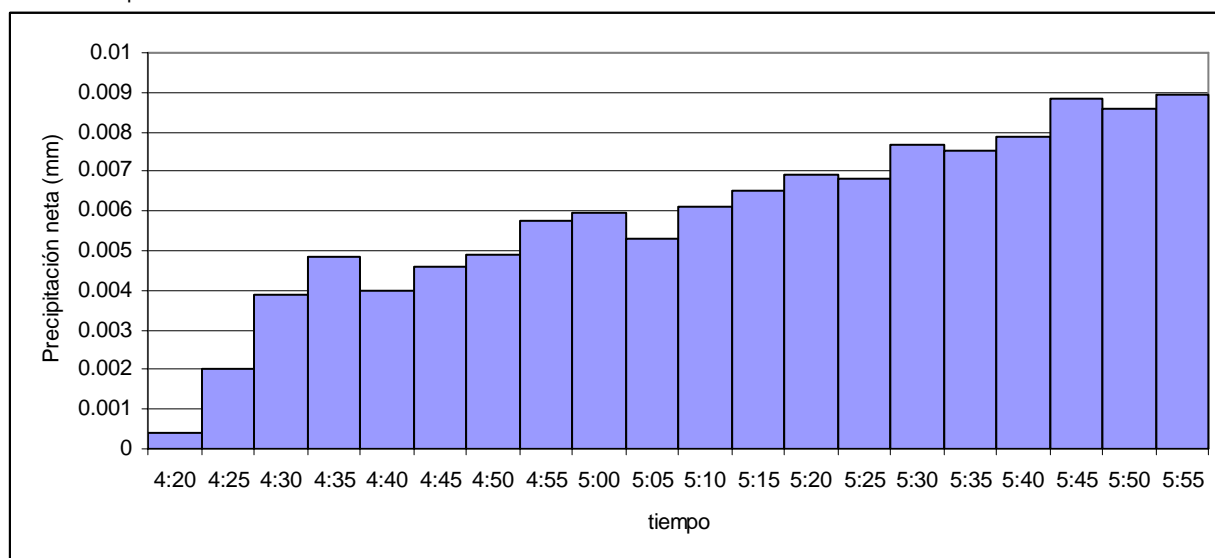
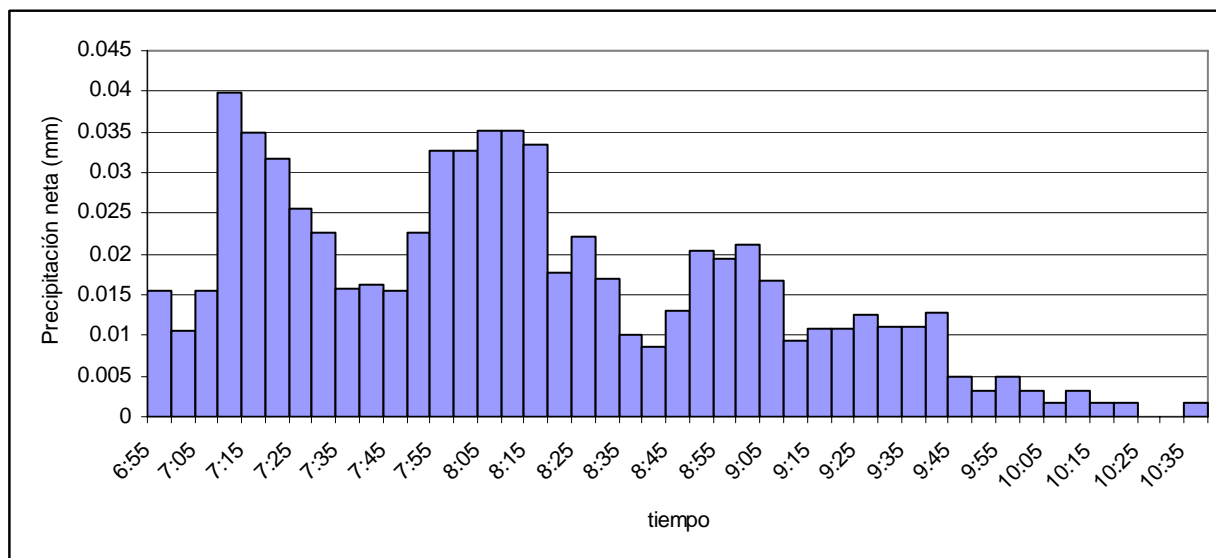
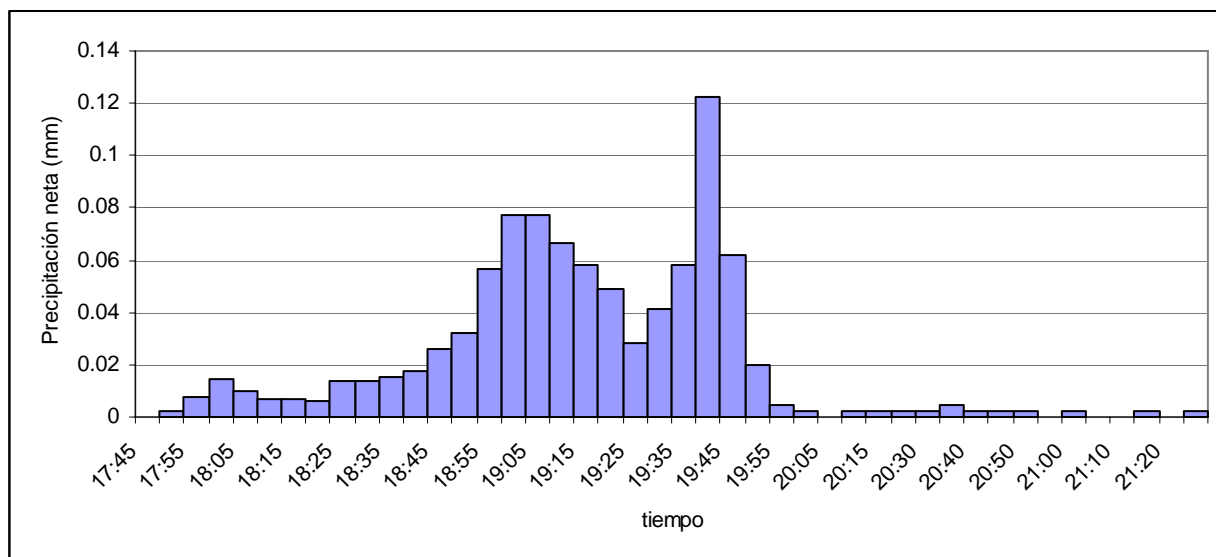


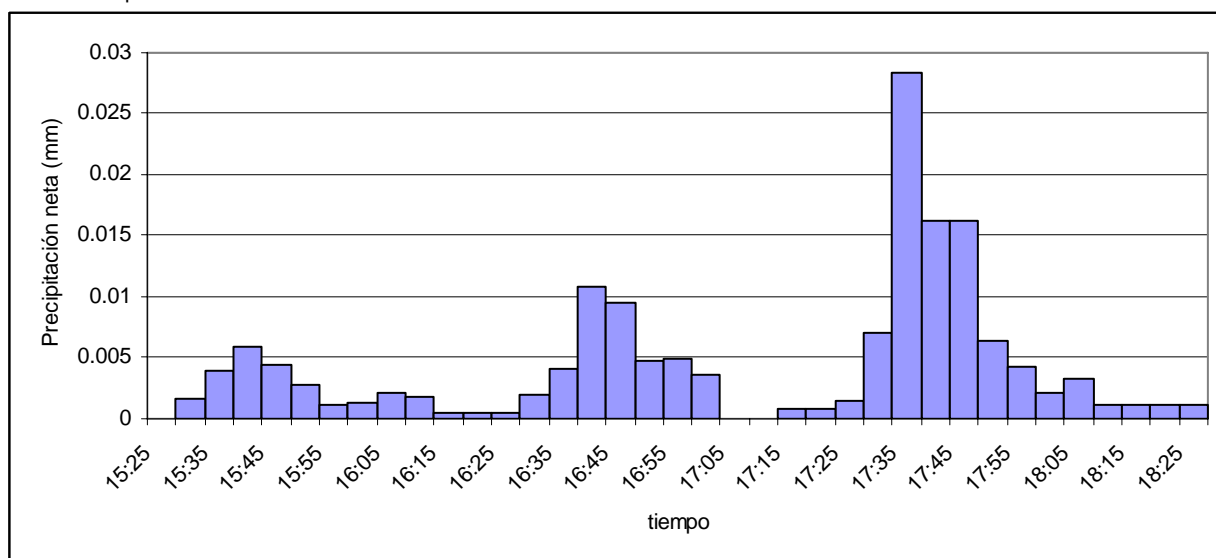
Gráfico 61: Episodio de lluvia neta 5 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



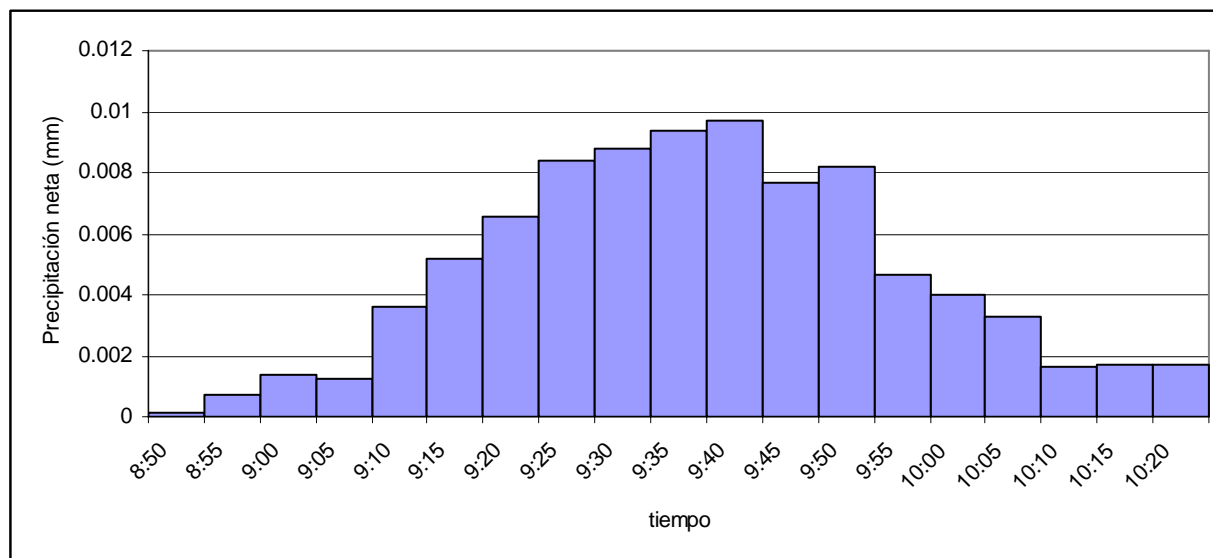
**Gráfico 62:** Episodio de lluvia neta 6 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



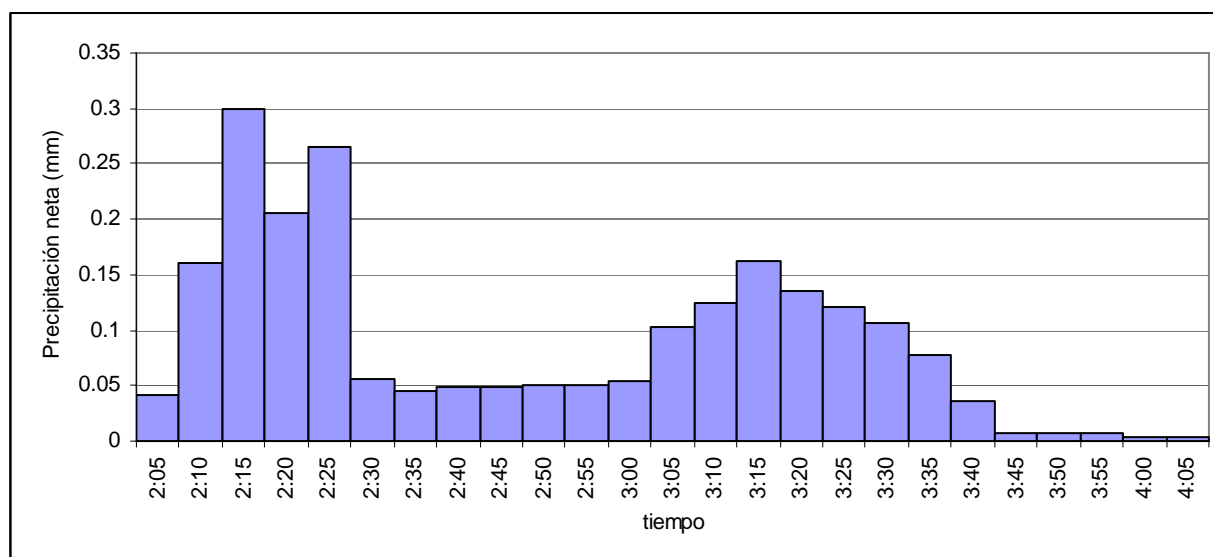
**Gráfico 63:** Episodio de lluvia neta 7 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



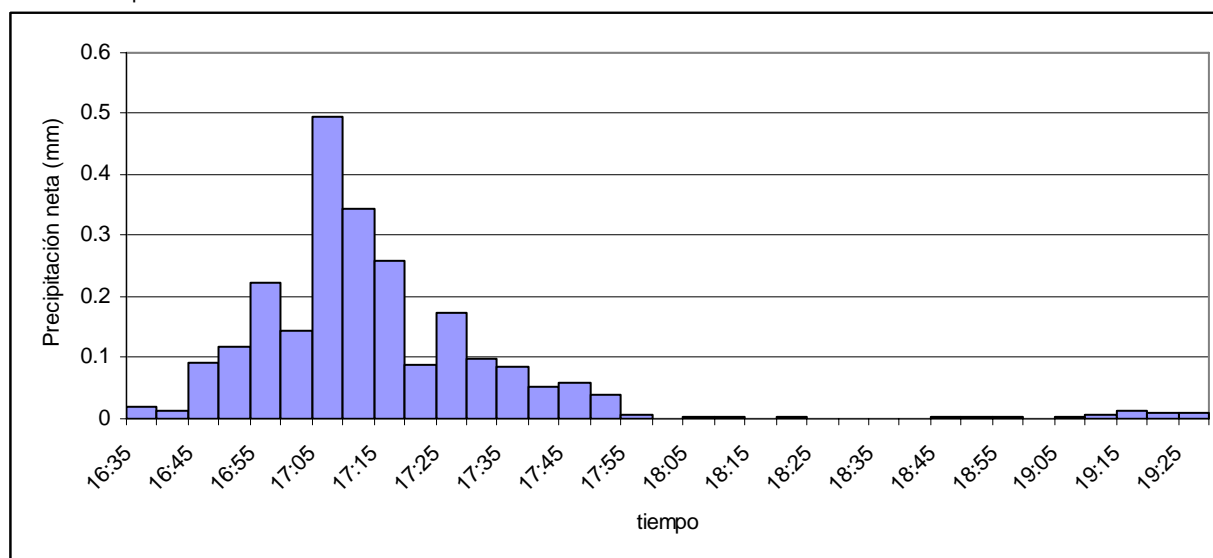
**Gráfico 64:** Episodio de lluvia neta 8 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



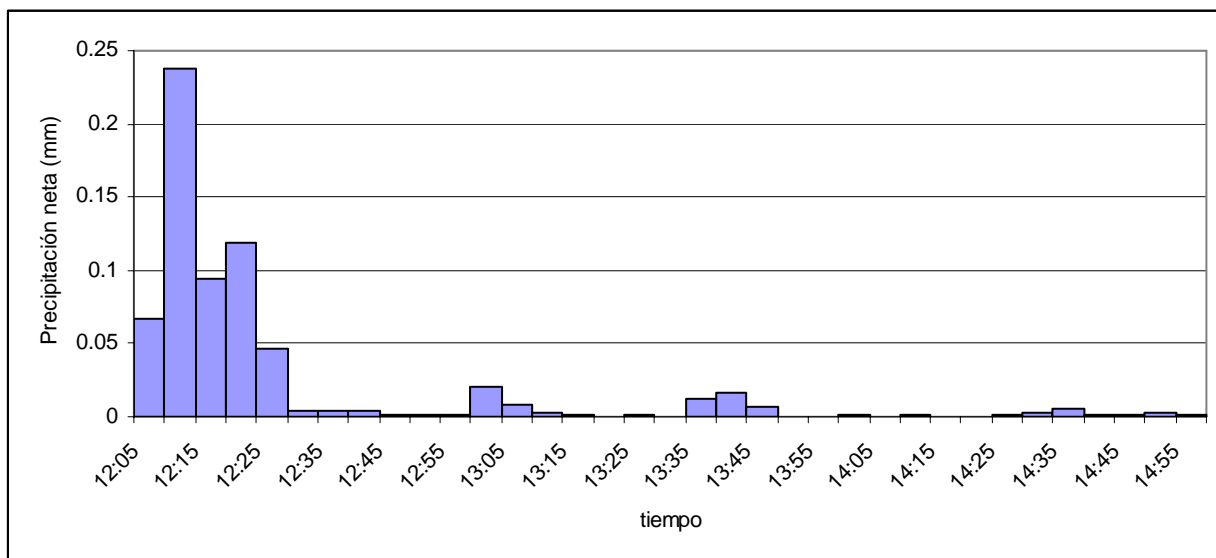
**Gráfico 65:** Episodio de lluvia neta 9 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



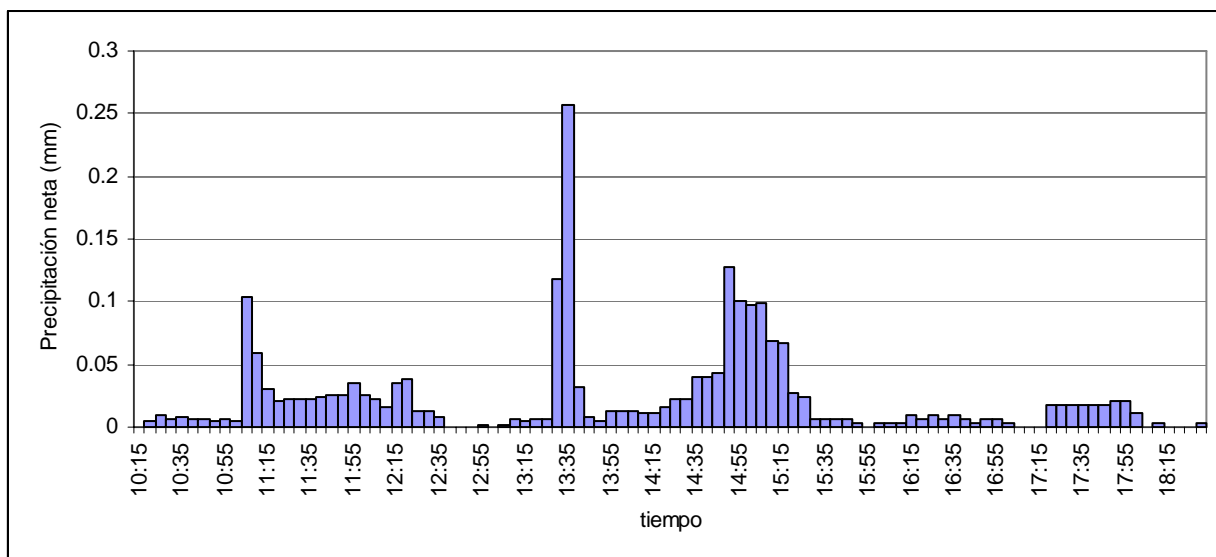
**Gráfico 66:** Episodio de lluvia neta 10 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



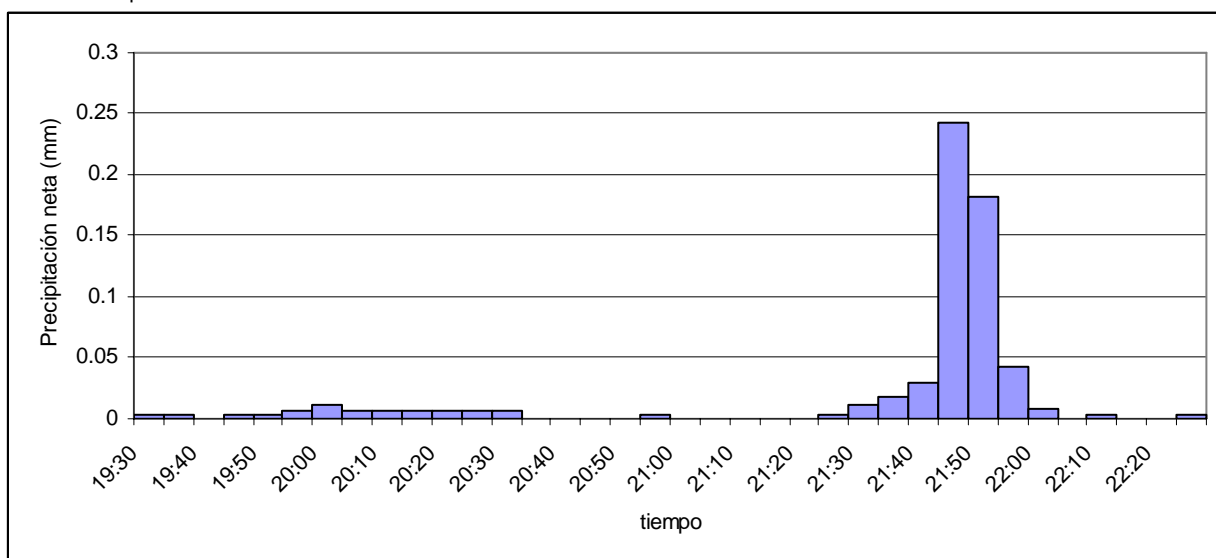
**Gráfico 67:** Episodio de lluvia neta 11 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



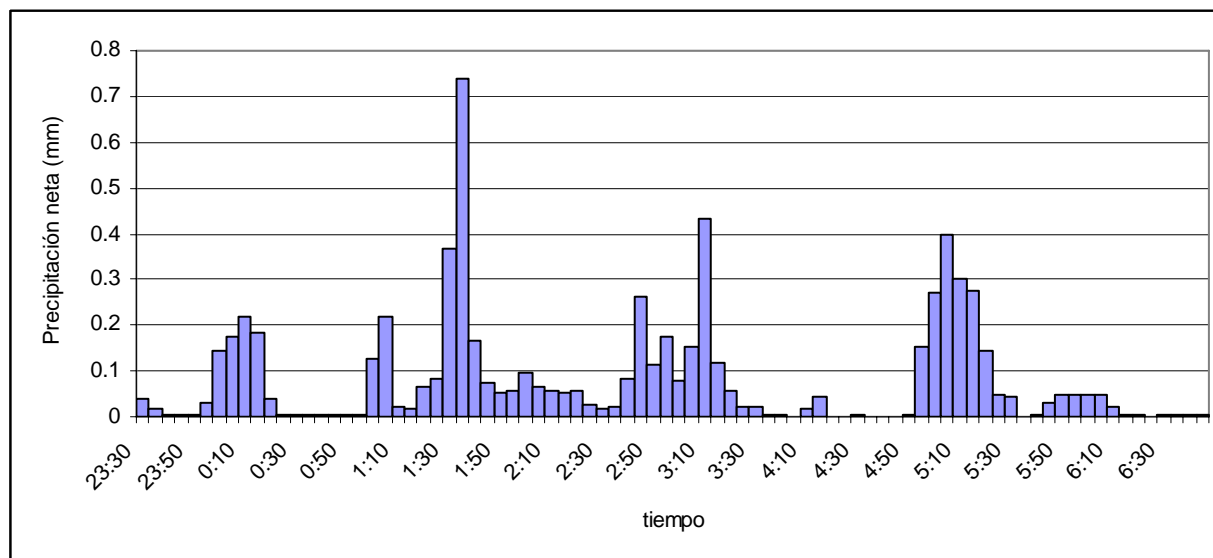
**Gráfico 68:** Episodio de lluvia neta 12 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



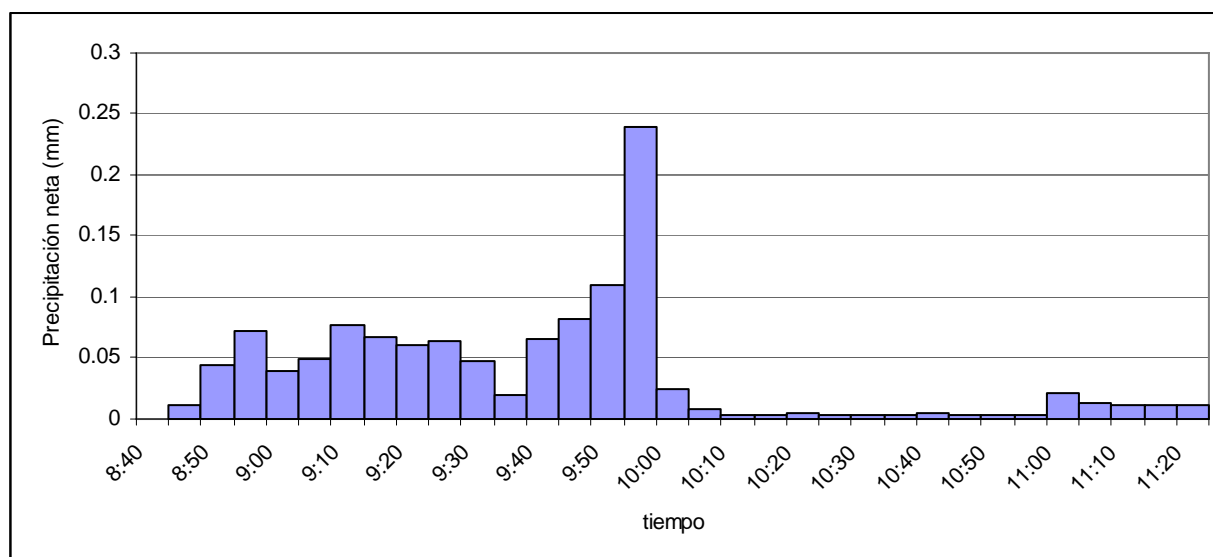
**Gráfico 69:** Episodio de lluvia neta 13 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



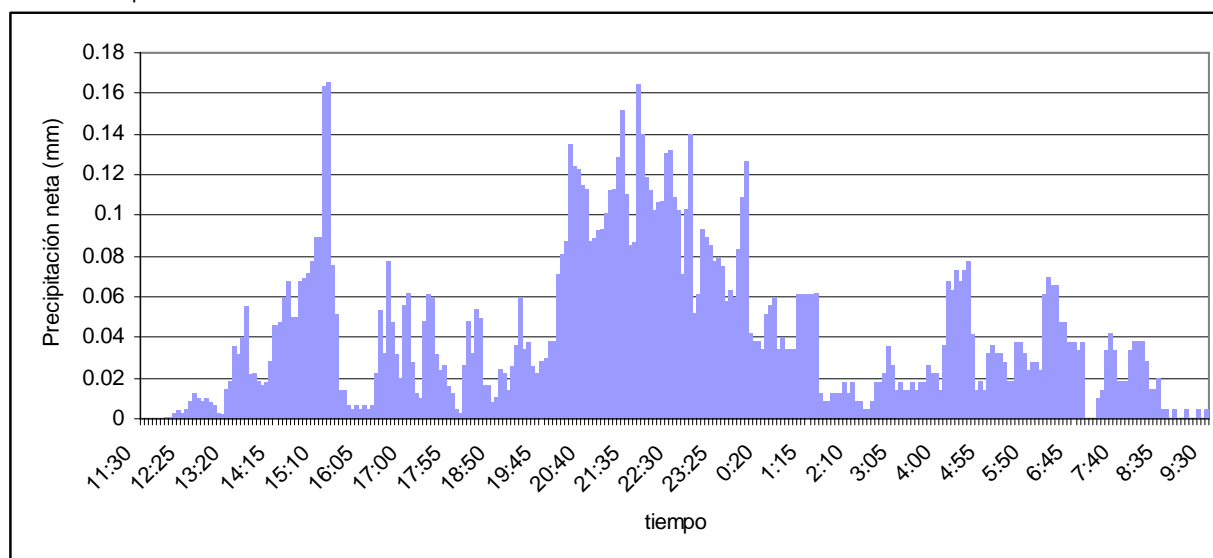
**Gráfico 70:** Episodio de lluvia neta 14 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



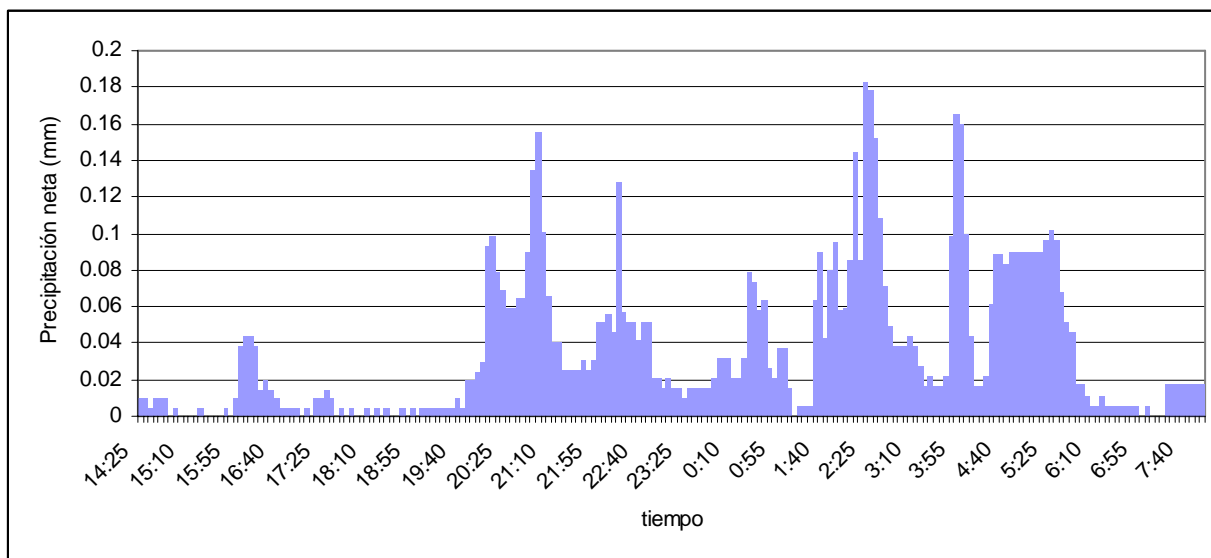
**Gráfico 71:** Episodio de lluvia neta 15 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



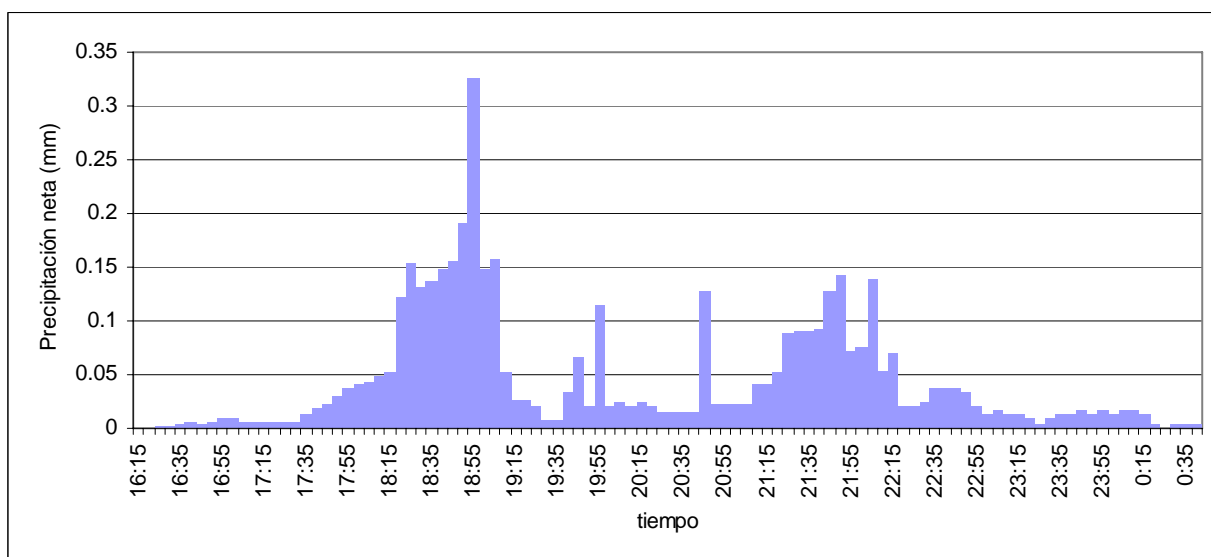
**Gráfico 72:** Episodio de lluvia neta 16 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



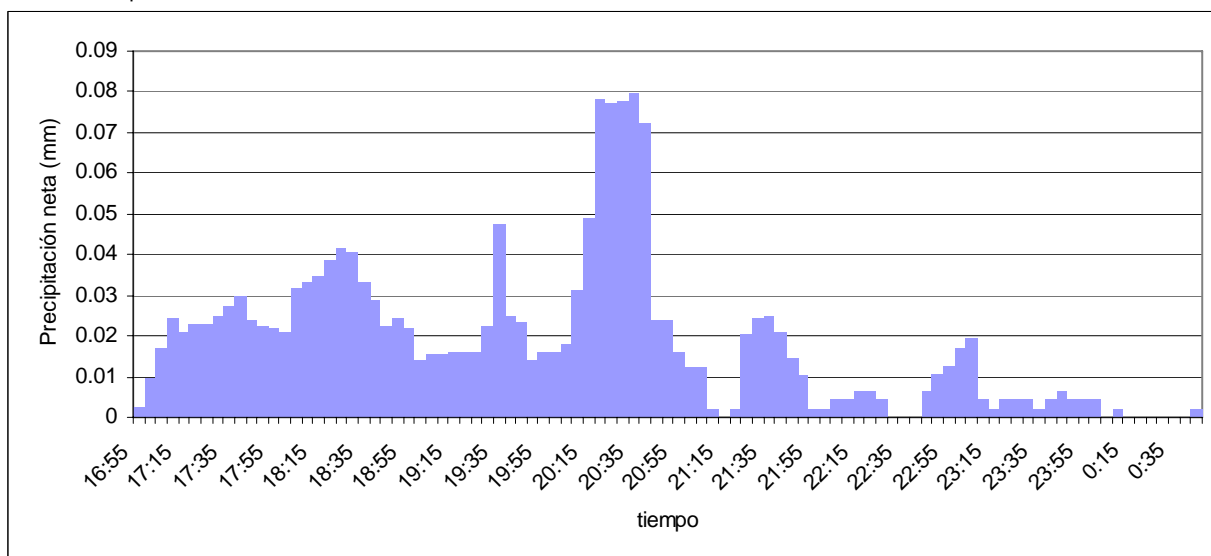
**Gráfico 73:** Episodio de lluvia neta 17 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



**Gráfico 74:** Episodio de lluvia neta 18 de la serie anual en la cuenca Masdeu.



**Gráfico 75:** Episodio de lluvia neta 1 de la serie anual en la cuenca Montbau.



**Gráfico 76:** Episodio de lluvia neta 3 de la serie anual en la cuenca Montbau.

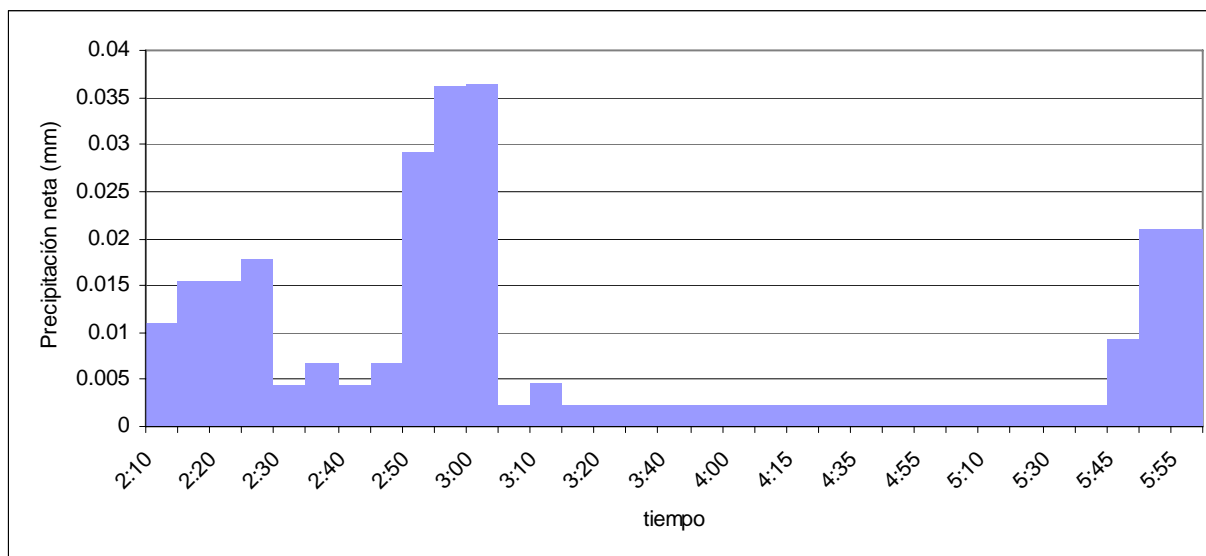


Gráfico 77: Episodio de lluvia neta 4 de la serie anual en la cuenca Montbau.

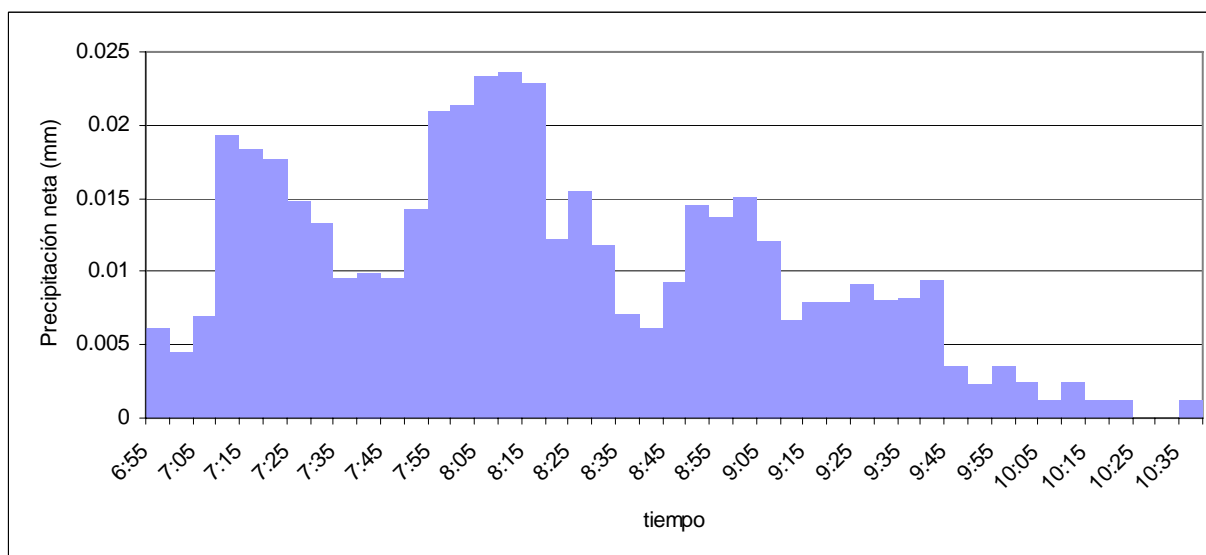


Gráfico 78: Episodio de lluvia neta 6 de la serie anual en la cuenca Montbau.

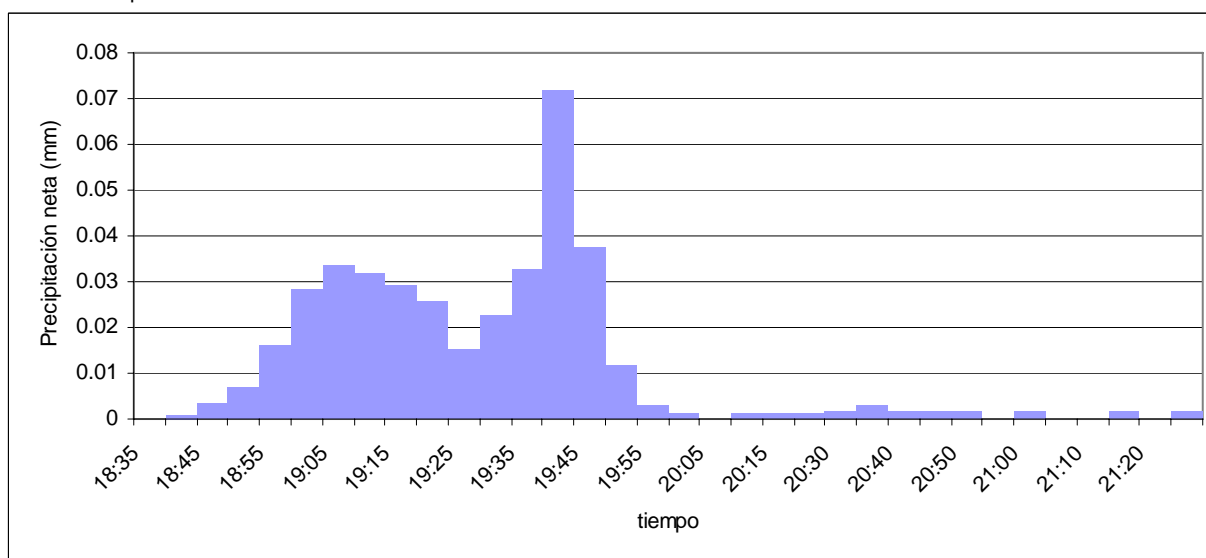
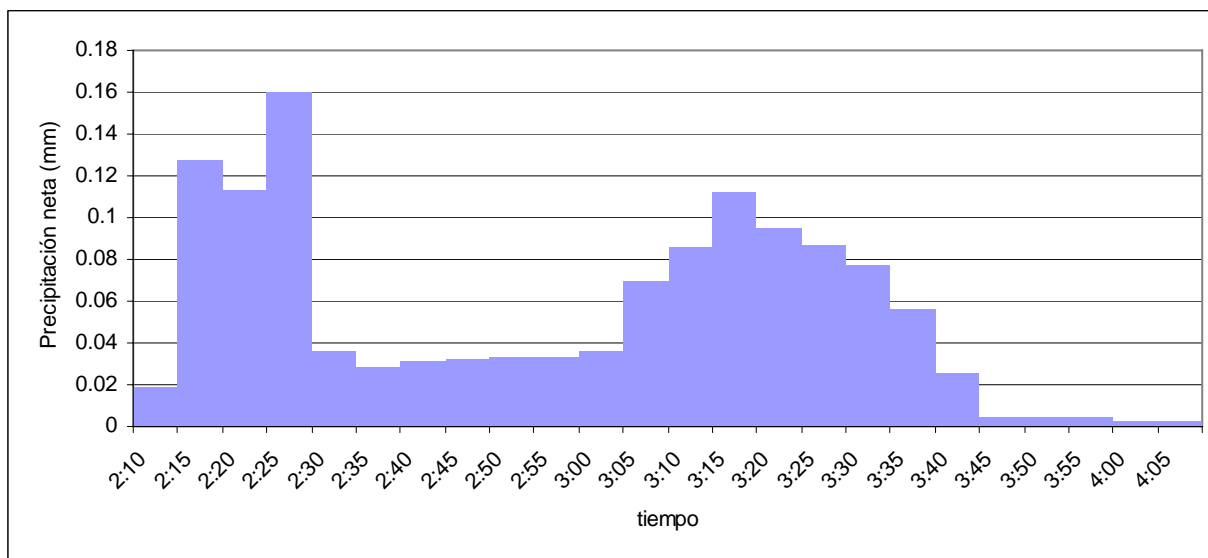
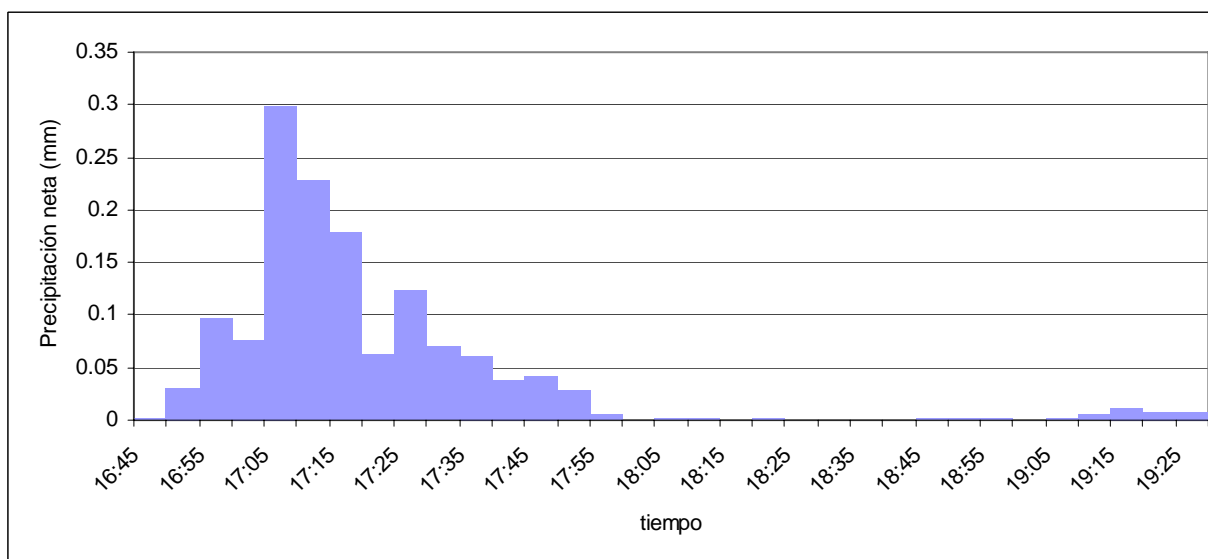


Gráfico 79: Episodio de lluvia neta 7 de la serie anual en la cuenca Montbau.

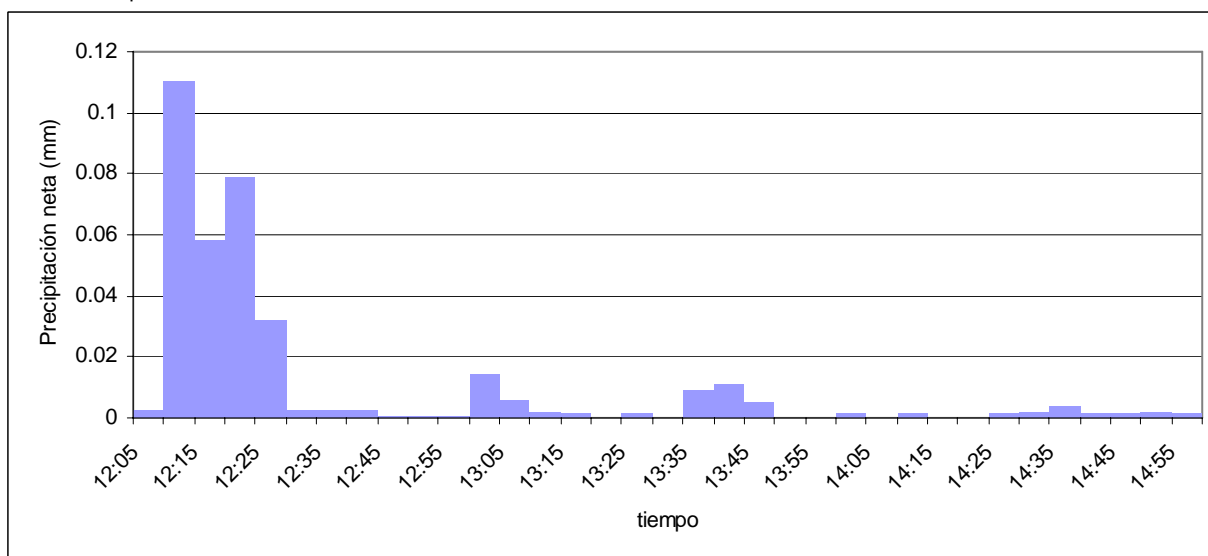




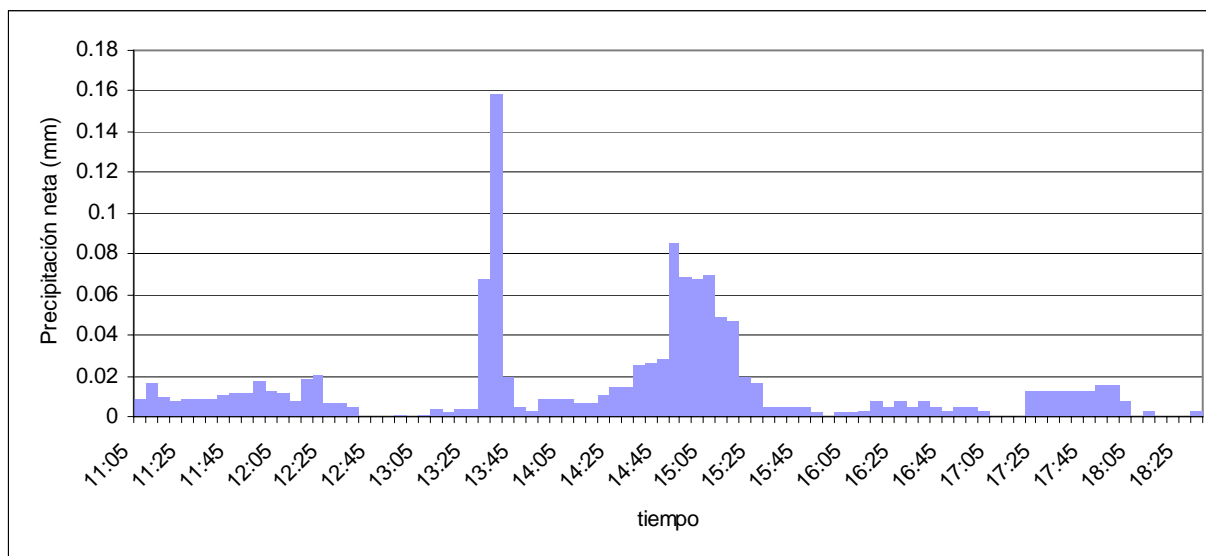
**Gráfico 80:** Episodio de lluvia neta 10 de la serie anual en la cuenca Montbau.



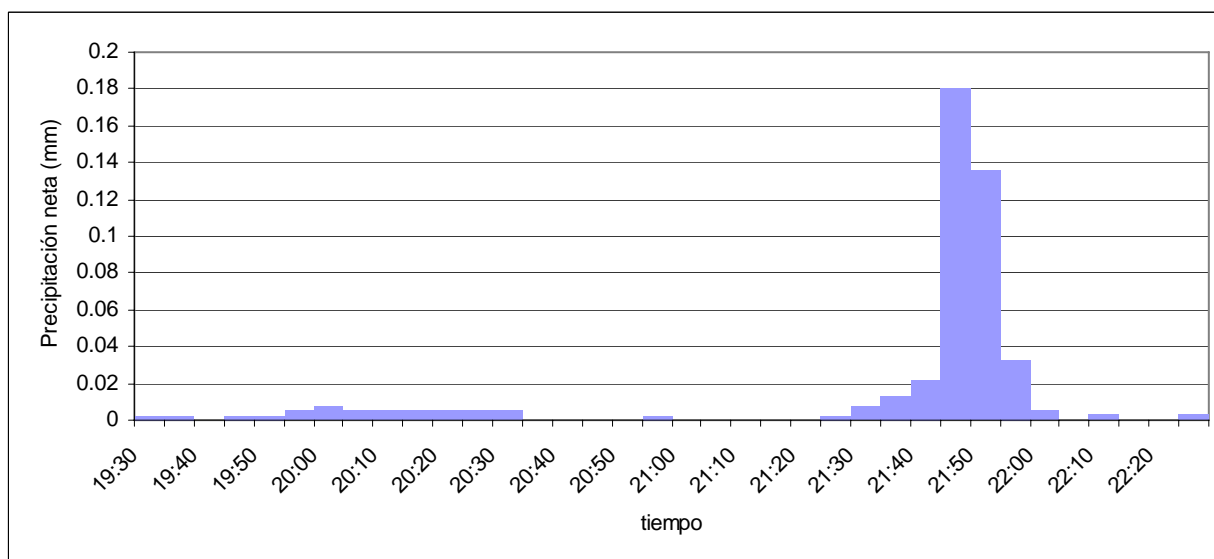
**Gráfico 81:** Episodio de lluvia neta 11 de la serie anual en la cuenca Montbau.



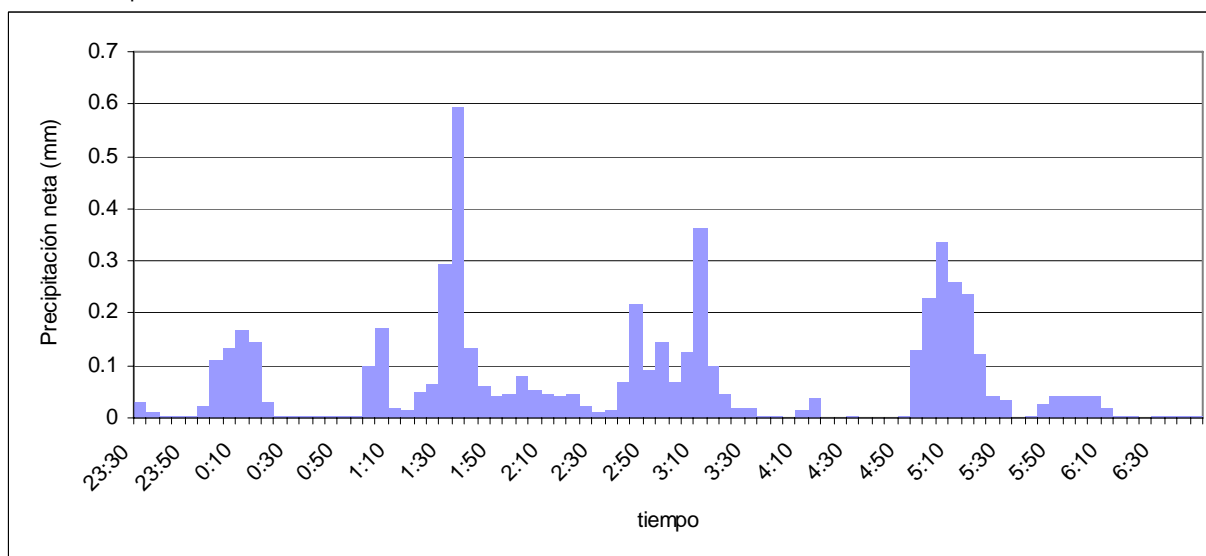
**Gráfico 82:** Episodio de lluvia neta 12 de la serie anual en la cuenca Montbau.



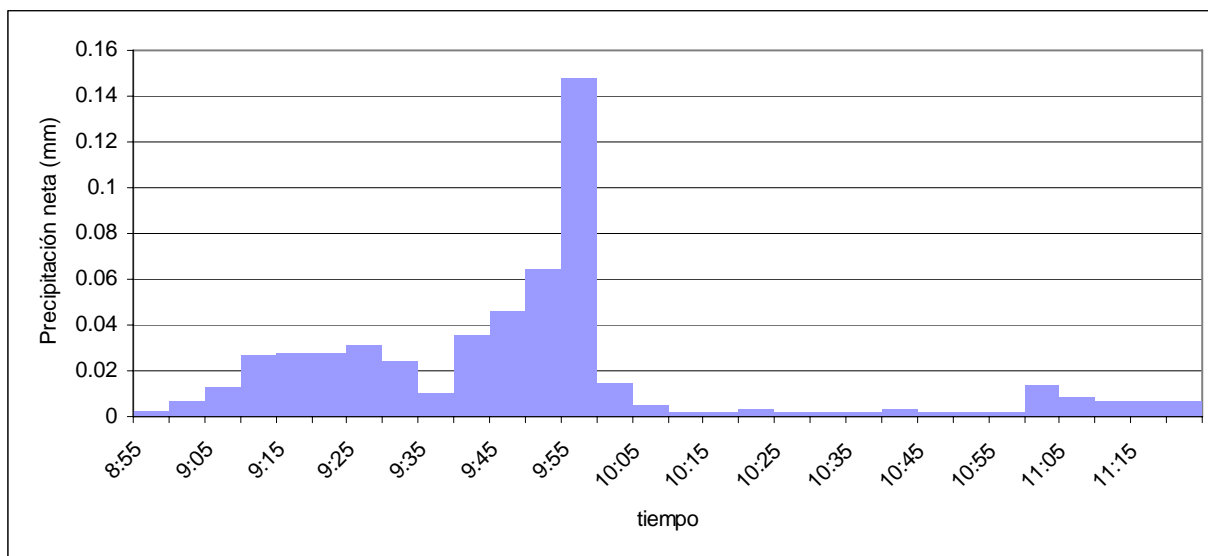
**Gráfico 83:** Episodio de lluvia neta 13 de la serie anual en la cuenca Montbau



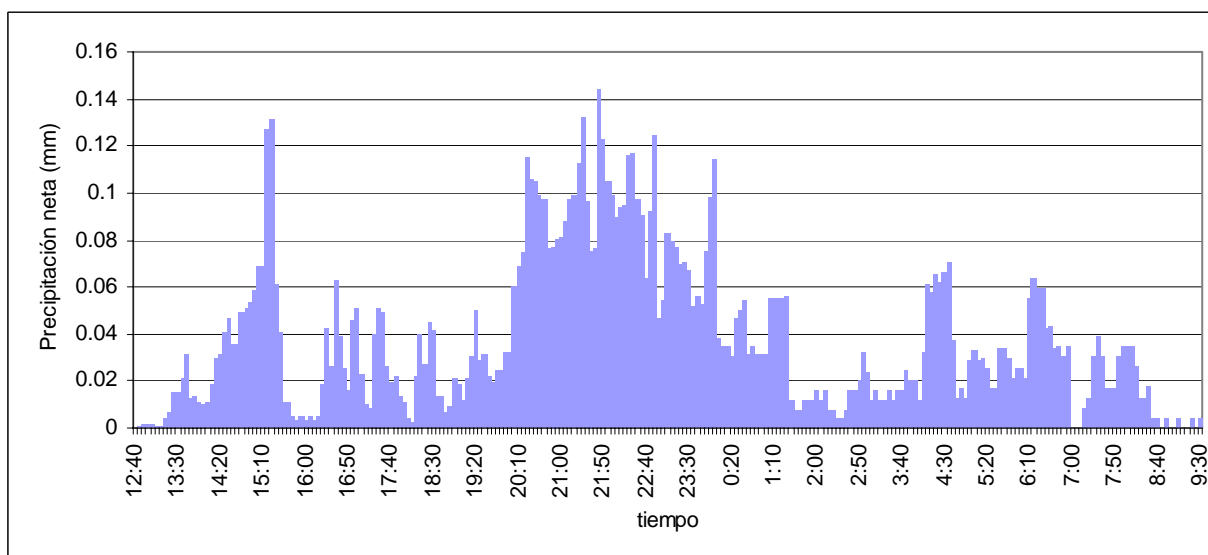
**Gráfico 84:** Episodio de lluvia neta 14 de la serie anual en la cuenca Montbau.



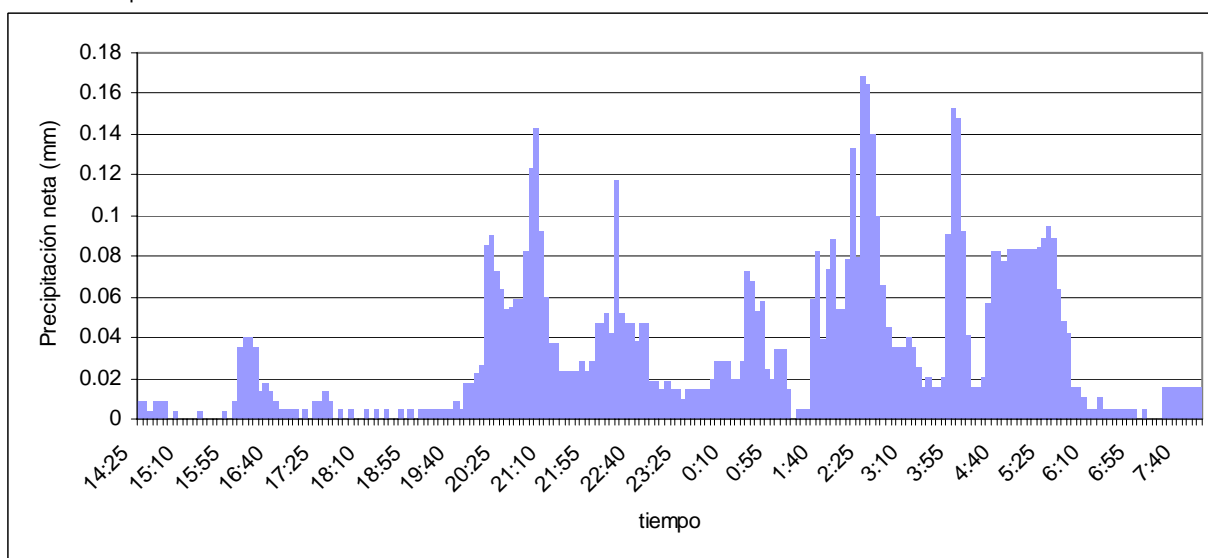
**Gráfico 85:** Episodio de lluvia neta 15 de la serie anual en la cuenca Montbau.



**Gráfico 86:** Episodio de lluvia neta 16 de la serie anual en la cuenca Montbau.



**Gráfico 87:** Episodio de lluvia neta 17 de la serie anual en la cuenca Montbau.



**Gráfico 88:** Episodio de lluvia neta 18 de la serie anual en la cuenca Montbau.



### 3. CÓDIGOS FUENTE PROGRAMACIÓN

#### SUBROUTINA DE PARAMETRIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA

```
O = input ('Introduzca matriz de orientación: ');
f = size(O,1);
c = size(O,2);
fd = input ('Fila del punto de desagüe: ');
cd = input ('Columna del punto de desagüe: ');

V=zeros(f,c); %Matriz de número de celdas tributarias

for j=1 %Las celdas de los contornos del grid se marcan con -1
    for i=1:c
        V(j,i)=-1;
    end
end
for j=f
    for i=1:c
        V(j,i)=-1;
    end
end
for j=1:f
    for i=1
        V(j,i)=-1;
    end
end
for j=1:f
    for i=c
        V(j,i)=-1;
    end
end
for j=2:f-1
    for i=2:c-1
        R=[O(j-1,i-1) O(j-1,i) O(j-1,i+1) O(j,i-1) O(j,i+1) O(j+1,i-1) O(j+1,i)
O(j+1,i+1)];
        S=[4 8 16 2 32 1 128 64];
        T=R==S; %Si el valor de R coincide con S se devuelve un 1, sino 0.
        U=T(1)+T(2)+T(3)+T(4)+T(5)+T(6)+T(7)+T(8);
        if O(j,i)==-9999
            V(j,i)=-1;
        else
            if U==8
                V(j,i)=8;
            end
            if U==7
                V(j,i)=7;
            end
            if U==6
                V(j,i)=6;
            end
            if U==5
                V(j,i)=5;
            end
            if U==4
                V(j,i)=4;
            end
            if U==3
                V(j,i)=3;
            end
            if U==2
                V(j,i)=2;
            end
        end
    end
end
```

```

        if U==1
            V(j,i)=1;
        end
        if U==0
            V(j,i)=0;
        end
    end
end
end

J=cell(f,c); %Matriz de matrices que nos devuelve la posición de las celdas tributarias

for j=2:f-1
    for i=2:c-1
        J{j,i}=(zeros(1,8));
    end
end

for j=2:f-1
    for i=2:c-1
        R=[O(j-1,i-1) O(j-1,i) O(j-1,i+1) O(j,i-1) O(j,i+1) O(j+1,i-1) O(j+1,i)
O(j+1,i+1)];
        S=[4 8 16 2 32 1 128 64];
        J{j,i}=R==S;
    end
end

CE=zeros(f,c); %Matriz que identifica unívocamente a cada celda

for j=1
    for i=1:c
        CE(j,i)=i;
    end
end
for j=2:f
    for i=1:c
        CE(j,i)=j*c+i;
    end
end

IF=zeros(f,c); %Matriz de inicio de senderos de flujo y punto de desagüe

for j=1:f
    for i=1:c
        if V(j,i)==0
            IF(j,i)=1; %Si la celda no tiene tributarias (inicio) devuelve un 1
        else
            IF(j,i)=0; %Si la celda se encuentra enmedio de un flowpath devuelve 0
        end
        if j==fd && i==cd
            IF(j,i)=2; %Si la celda coincide con el punto de desagüe devuelve un 2
        end
    end
end

w=sum(sum(IF))-2; %Cálculo del número de flowpaths
be=f*c; %Número de celdas máximo por flowpath

REC=cell(f,c); %Matriz de matrices de recorrido de los flowpaths

for j=1:f
    for i=1:c
        if V(j,i)==0 %Se inicia el flowpath en una celda inicial
            r(1)=j;
            s(1)=i;
            for h=1:be

```

```

REC{r(1),s(1)}(1)=CE(r(1),s(1)); %Celda inicial del recorrido, en
función de la dirección se da valor a la segunda posición del recorrido y así
sucesivamente...
    if O(r(h),s(h))==1
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)+1);
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h)+1;
    end
    if O(r(h),s(h))==2
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)+1);
        s(h+1)=s(h)+1;
        r(h+1)=r(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==4
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)+1);
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h)+1;
    end
    if O(r(h),s(h))==8
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h));
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==16
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==32
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)-1);
        s(h+1)=s(h)-1;
        r(h+1)=r(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==64
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==128
        REC{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h));
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if REC{r(1),s(1)}(h)==CE(fd,cd);
        break %...hasta que la celda en cuestión es el desagüe y se para
el bucle, para continuar analizando la siguiente celda de inicio de recorrido.
    end
end
end
end
end

RECI=cell(f,c); %Matriz de senderos iniciales, recorridos hasta la unión de dos
recorridos.
for j=1:f
    for i=1:c
        if V(j,i)==0 %Se inicia el flowpath en una celda inicial
            r(1)=j;
            s(1)=i;
            for h=1:be
                RECI{r(1),s(1)}(1)=CE(r(1),s(1));
                if O(r(h),s(h))==1
                    RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)+1);
                    r(h+1)=r(h)-1;
                    s(h+1)=s(h)+1;
                end
            end
        end
    end
end

```

```

    if O(r(h),s(h))==2
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)+1);
        s(h+1)=s(h)+1;
        r(h+1)=r(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==4
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)+1);
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h)+1;
    end
    if O(r(h),s(h))==8
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h));
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==16
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==32
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)-1);
        s(h+1)=s(h)-1;
        r(h+1)=r(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==64
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==128
        RECI{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h));
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if V(r(h+1),s(h+1))>=2;
        break %Misma estructura que la anterior pero se finaliza cuando
una celda tiene dos o mas celdas tributarias
    end
end
end
end

RECU=cell(f,c); % matriz de senderos entre uniones

for j=1:f
    for i=1:c
        if V(j,i)>=2 %Se inicia el flowpath en una celda que tenga dos o mas
tributarias
            r(1)=j;
            s(1)=i;
            for h=1:be
                RECU{r(1),s(1)}(1)=CE(r(1),s(1));
                if O(r(h),s(h))==1
                    RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)+1);
                    r(h+1)=r(h)-1;
                    s(h+1)=s(h)+1;
                end
                if O(r(h),s(h))==2
                    RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)+1);
                    s(h+1)=s(h)+1;
                    r(h+1)=r(h);
                end
                if O(r(h),s(h))==4
                    RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)+1);
                    r(h+1)=r(h)+1;

```



```

        s(h+1)=s(h)+1;
    end
    if O(r(h),s(h))==8
        RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h));
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==16
        RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)+1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)+1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==32
        RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h),s(h)-1);
        s(h+1)=s(h)-1;
        r(h+1)=r(h);
    end
    if O(r(h),s(h))==64
        RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h)-1);
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h)-1;
    end
    if O(r(h),s(h))==128
        RECU{r(1),s(1)}(h+1)=CE(r(h)-1,s(h));
        r(h+1)=r(h)-1;
        s(h+1)=s(h);
    end
    if V(r(h+1),s(h+1))>=2;
        break %Misma estructura que la anterior
    end
end
end
end
end

F=zeros(f,c); %Matriz de jerarquía hidrológica de uniones (celdas con dos o más
tributarias); determina el número de veces que una unión se encuentra en los
diferentes flowpaths
IG=zeros(f,c); %Marca las celdas que tienen en su recorrido el valor de la celda
fijada

for j=2:f
    for i=2:c
        if V(j,i)>=2
            for k=1:f
                for h=1:c
                    if REC{k,h}~=0
                        mo=find(REC{k,h}==CE(j,i));
                        nc=size(mo,2);
                        IG(k,h)=nc;
                    end
                end
            end
            F(j,i)=sum(sum(IG));
        end
    end
end
end

FJ=zeros(f,c); %Matriz de jerarquía hidrológica de celdas; determina el número de
veces que una celda (sea o no una unión de senderos) se encuentra en los diferentes
flowpaths
IH=zeros(f,c); %Marca las celdas que tienen en su recorrido el valor de la celda
fijada

```

```

for j=2:f
    for i=2:c
        if V(j,i)~=0 && V(j,i)~-=-1
            for k=1:f
                for h=1:c
                    if REC{k,h}~=0
                        mo=find(REC{k,h}==CE(j,i));
                        nc=size(mo,2);
                        IH(k,h)=nc;
                    end
                end
            end
            FJ(j,i)=sum(sum(IH));
        end
    end
end

POS=zeros(f,c); % Matriz de posición de celdas en senderos entre uniones. Ordena
secuencialmente (1,2,3...) las celdas de una mismo recorrido que se encuentran entre dos
unicones.

for j=1:f
    for i=1:c
        if RECU{j,i}~=0 & j~=fd & i~=cd
            for h=2:size(RECU{j,i},2)
                for k=1:f
                    for r=1:c
                        if RECU{j,i}(h)==CE(k,r)
                            POS(k,r)=h-1; %Se rastrea la celda de la posición h en el
recorrido y se marca con h-1
                        end
                    end
                end
            end
            if RECU{j,i}(h)==0
                break
            end
        end
    end
end

POSI=zeros(f,c); % Matriz de posición de celdas en senderos iniciales. Ordena
secuencialmente (1,2,3...) las celdas de una mismo recorrido que se encuentran entre el
inicio de recorrido y la primera unión.

for j=1:f
    for i=1:c
        if RECI{j,i}~=0
            for h=2:size(RECI{j,i},2)
                for k=1:f
                    for r=1:c
                        if RECI{j,i}(h)==CE(k,r)
                            POSI(k,r)=h-1;
                        end
                    end
                end
            end
            if RECI{j,i}(h)==0
                break
            end
        end
    end
end
end

```

```

CF=zeros(f,c); % Matriz de cursos fluviales; indica con un 1 las celdas que presentan
flujo canalizado y con -9999 las celdas con flujo hortoniano
x=max(max(FJ));
for j=1:f
    for i=1:c
        if FJ(j,i)>x/6; %Valor umbral de jerarquía hidrológica de la celda para que
se presente flujo canalizado. Por defecto es un sexto de x (puede modificarse)
            CF(j,i)=1;
        else
            CF(j,i)=-9999;
        end
    end
end

MAN=zeros(f,c); % Matriz de fricción
mho=input('Introduzca fricción horton: ');
mfl=input('Introduzca fricción flujo: ');
for j=1:f
    for i=1:c
        if CF(j,i)==1;
            MAN(j,i)=mfl;
        else
            MAN(j,i)=mho;
        end
    end
end

B=zeros(f,c); % Matrices de anchos de regueros
A=zeros(f,c); % Matrices de ángulos de regueros
ancho=input('Introduzca ancho regueros (m): ');
angle=input('Introduzca ángulo regueros (°): ');
for j=1:f
    for i=1:c
        if CF(j,i)==1;
            B(j,i)=ancho;
            A(j,i)=angle;
        else
            B(j,i)=-9999;
            A(j,i)=-9999;
        end
    end
end

```

## SUBROUTINA DE ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LOS REGUEROS

```

BASE = input ('Introduzca matriz de anchos de río: ');
ANG = input ('Introduzca matriz de ángulo de talud: ');
r = size(BASE,1);
co = size(ANG,2);
AREA = zeros(1,100);
PERI = zeros(1,100);
h=linspace(0.05,5);
x=zeros(1,100);
y=zeros(1,100);
m=zeros(r,co);
b=zeros(r,co);
cof=zeros(r,co);
expl=zeros(r,co);
exp2=zeros(r,co);
exp3=zeros(r,co);
R2=zeros(r,co);

```

```

for k=1:r
    for j=1:co
        if BASE(k,j)~= -9999
            for i=1:100
                AREA(i)=(BASE(k,j)+(1/tand(ANG(k,j)))*h(i))*h(i);
                PERI(i)=BASE(k,j)+2*h(i)*(1+(1/tand(ANG(k,j))^2))^0.5;
                x(i)=log10(AREA(i));
                y(i)=log10(PERI(i));
            end
            p=polyfit(x,y,1); %Ajuste potencial por mínimos cuadrados del perímetro
mojado en función del área
            m(k,j)=p(1);
            b(k,j)=10^p(2);
            cof(k,j)=(1/b(k,j)^(2/3))*((5/3)-
m(k,j)*(2/3))*(1/((1/b(k,j)^(2/3))^(1/((5/3)-m(k,j)*(2/3))))^(5/3)-m(k,j)*(2/3)-1);
            exp1(k,j)=0.5-(0.5*(1/((5/3)-m(k,j)*(2/3)))*((5/3)-m(k,j)*(2/3)-1));
            exp2(k,j)=(1/((5/3)-m(k,j)*(2/3)))*((5/3)-m(k,j)*(2/3)-1)-1;
            exp3(k,j)=(1/((5/3)-m(k,j)*(2/3)))*((5/3)-m(k,j)*(2/3)-1);
            f=polyval(p,x);
            error=f-y;
            R2(k,j)=1-var(error)/var(y);
        end
    end
end

```

## SUBROUTINA DE CÁLCULO HIDROLÓGICO

```

%O = input ('Introduzca matriz de orientación: ');
r = size(O,1);
co = size(O,2);
X = input ('Ancho de celda (m): ');
%V = input ('Introduzca matriz de celdas tributarias: ');
%F = input ('Introduzca matriz de categoría de uniones: ');
%FJ = input ('Introduzca matriz de categoría de celdas: ');
%P = input ('Introduzca matriz de pendientes (m/m): ');
%J = input ('Introduzca matriz de matrices de direcciones: ');
%POS = input ('Introduzca matriz de senderos entre uniones: ');
%POSI = input ('Introduzca matriz de senderos iniciales: ');
%CF = input ('Introduzca matriz de ríos: ');

Llu = input ('Introduzca vector de lluvia neta: ');
Llu2 = input ('Introduzca vector de lluvia bruta: ');
int = size(Llu,1);
int2 = size(Llu2,1);
t = input ('Introduzca el tiempo de intervalo (min): ');
tfinal = input ('Introduzca duración de cálculo: ');

L = X;
x = X/5; %Discretización especial de las celdas
th=t*60;
f=(tfinal/t)+1; %Número de pasos en el tiempo
c=(L/x)+1; %Número de pasos en el espacio

I=(1:int);
for i=1:int
    I(i)=Llu(i)/(1000*th);
end
IT=zeros(f,1); %Vector intensidad de precipitación
for i=2:int+1
    IT(i,1)=I(i-1);
end

q=cell(r,co); %Matriz de matrices de caudales unitarios
for k=2:r-1
    for h=2:co-1
        q{k,h}=(zeros(f,c));
    end
end

```

```

end
gap=cell(r,co); %Matriz de matrices de caudales de salida de cada celda
for k=1:r
    for h=1:co
        gap{k,h}=(zeros(f,1));
    end
end
Qap=cell(r,co); %Matriz de matrices de caudales totales de salida de cada celda
for k=1:r
    for h=1:co
        Qap{k,h}=(zeros(f,1));
    end
end
n = input ('Introduzca matriz de fricciones: ');
maxiter = 1000;
x_actual = 0.01;
for z=0;
    for k=1:r
        for h=1:co
            if F(k,h)==z
                if V(k,h)==0 %Cálculo hidrológico de todas las celdas que son inicio
                    de los diferentes recorridos del agua
                        S = P(k,h);
                        for j=2:f; %Solución de la onda cinemática con el método de Newton
                            for i=2:c;
                                tol_x = 0.000001;
                                rel_x=[];
                                tol_f = 0.000001 ;
                                for s=1:maxiter;
                                    fx=((x_actual-q{k,h})(j-
                                        1,i))/th)+((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5)))*((x_actual-q{k,h})(j,i-
                                        1))/x)-((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5))*IT(j,1);
                                    dx=(1/th)+((S^(3/10))*(n(k,h)^(-
                                        3/5))/x)*(2*(x_actual^(2/5))-q{k,h})(j,i-1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5))-
                                        IT(j,1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5)));
                                    x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
                                    rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
                                    if abs(fx)<tol_f && abs(rel_x(s))<tol_x;
                                        sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                                        q{k,h}(j,i)=real(x_nuevo);
                                        qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                                        if CF(k,h)=-9999
                                            Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c)*X;
                                        else
                                            Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                                        end
                                        break % si se ha conseguido convergencia,
salimos del bucle
                                end
                                x_actual=x_nuevo;
                            end
                        if abs(fx)>tol_f || abs(rel_x(s))>tol_x
                            sprintf ('No ha habido convergencia en %d
iteraciones',maxiter);
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end

```

```

for y=1:max(max(POSI))
    for k=1:r
        for h=1:co
            if V(k,h)==1 && POSI(k,h)==y %Cálculo hidrológico de todas las celdas que
se encuentran entre el inicio de los diferentes recorridos del agua y la primera unión
entre dos recorridos
                S = P(k,h);
                for j=2:f; %Cálculo del caudal inicial de cada celda a partir del
caudal en el punto de salida de las celdas tributarias
                    if J{k,h}(1)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k-1,h-1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k-1,h-1}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(2)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k-1,h}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k-1,h}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(3)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k-1,h+1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k-1,h+1}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(4)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k,h-1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k,h-1}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(5)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k,h+1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k,h+1}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(6)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k+1,h-1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k+1,h-1}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(7)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k+1,h}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k+1,h}(j);
                        end
                    end
                    if J{k,h}(8)==1
                        if CF(k,h)==-9999
                            q{k,h}(j,1)=qap{k+1,h+1}(j);
                        else
                            q{k,h}(j,1)=Qap{k+1,h+1}(j);
                        end
                    end
                end
            end
        for i=2:c;

```

```

        if CF(k,h)==-9999 %Solución de la onda cinemática con el
método de Newton si la celda presenta flujo hortoniano
            x_actual=q{k,h}(j,1);
            tol_x = 0.000001;
            rel_x=[];
            tol_f = 0.000001 ;
            for s=1:maxiter;
                fx=((x_actual-q{k,h}(j-
1,i))/th)+((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5)))*((x_actual-q{k,h}(j,i-
1))/x)-((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5))*IT(j,1);
                dx=(1/th)+((S^(3/10))*(n(k,h)^(-
3/5))/x)*(2*(x_actual^(2/5))-q{k,h}(j,i-1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5))-
IT(j,1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5)));
                x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
                rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
                if abs(fx)<tol_f && abs(rel_x(s))<tol_x;
                    sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                    q{k,h}(j,i)=real(x_nuevo);
                    qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                    if CF(k,h)==-9999
                        Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c)*X;
                    else
                        Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                    end
                    break % si se ha conseguido convergencia, salimos
del bucle
                end
                x_actual=x_nuevo;
            end
            if abs(fx)>tol_f || abs(rel_x(s))>tol_x
                sprintf('No ha habido convergencia en %d
iteraciones',maxiter);
            end
        else %Solución de la onda cinemática con el método de Newton
si la celda presenta flujo canalizado
            x_actual=q{k,h}(j,1);
            tol_x = 0.000001;
            rel_x=[];
            tol_f = 0.000001 ;
            for s=1:maxiter;
                fx=((x_actual-q{k,h}(j-
1,i))/th)+((cof(k,h))*(x_actual^(exp3(k,h)))*(S^(exp1(k,h)))*(n(k,h)^(exp2(k,h))))*((x
_actual-q{k,h}(j,i-1))/x)-
((cof(k,h))*(x_actual^(exp3(k,h)))*(S^(exp1(k,h)))*(n(k,h)^(exp2(k,h))))*IT(j,1)*x;
                dx=(1/th)+((1+exp3(k,h))*cof(k,h))*(S^(exp1(k,h))*x_actual^(exp3(k,h))*n(k,h)^(exp2(k,
h))*x^-1)-(cof(k,h)*exp3(k,h))*x_actual^(exp3(k,h)-
1)*S^(exp1(k,h))*n(k,h)^(exp2(k,h))*((q{k,h}(j,i-1)/x)+IT(j,1)*x);
                x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
                rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
                if abs(fx)<tol_f && abs(rel_x(s))<tol_x;
                    sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                    q{k,h}(j,i)=real(x_nuevo);
                    qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                    if CF(k,h)==-9999
                        Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c)*X;
                    else
                        Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                    end
                    break % si se ha conseguido convergencia, salimos
del bucle
                end
                x_actual=x_nuevo;
            end
            if abs(fx)>tol_f || abs(rel_x(s))>tol_x

```





```

                                N=[qap{k-1,h-1}(j) qap{k-1,h}(j) 0 qap{k,h-1}(j) 0 0 0
0];
                                else
                                N=[Qap{k-1,h-1}(j) Qap{k-1,h}(j) 0 Qap{k,h-1}(j) 0 0 0
0];
                                end
                                end
                                if h==1 && k~=1 && k~=r
                                if CF(k,h)==-9999
                                N=[0 qap{k-1,h}(j) qap{k-1,h+1}(j) 0 qap{k,h+1}(j) 0
qap{k+1,h}(j) qap{k+1,h+1}(j)];
                                else
                                N=[0 Qap{k-1,h}(j) Qap{k-1,h+1}(j) 0 Qap{k,h+1}(j) 0
Qap{k+1,h}(j) Qap{k+1,h+1}(j)];
                                end
                                end
                                if h==co && k~=1 && k~=r
                                if CF(k,h)==-9999
                                N=[qap{k-1,h-1}(j) qap{k-1,h}(j) 0 qap{k-1,h-1}(j) 0
qap{k-1,h-1}(j) qap{k+1,h}(j) 0];
                                else
                                N=[Qap{k-1,h-1}(j) Qap{k-1,h}(j) 0 Qap{k-1,h-1}(j) 0
Qap{k-1,h-1}(j) Qap{k+1,h}(j) 0];
                                end
                                end
                                if k~=1 && k~=r && h~=1 && h~=co
                                if CF(k,h)==-9999
                                N=[qap{k-1,h-1}(j) qap{k-1,h}(j) qap{k-1,h+1}(j)
qap{k,h-1}(j) qap{k,h+1}(j) qap{k+1,h-1}(j) qap{k+1,h}(j) qap{k+1,h+1}(j)];
                                else
                                N=[Qap{k-1,h-1}(j) Qap{k-1,h}(j) Qap{k-1,h+1}(j)
Qap{k,h-1}(j) Qap{k,h+1}(j) Qap{k+1,h-1}(j) Qap{k+1,h}(j) Qap{k+1,h+1}(j)];
                                end
                                end
                                q{k,h}(j,1)=sum(J{k,h}.*N);
                                for i=2:c;
                                if CF(k,h)==-9999 %Solución de la onda cinemática con el
método de Newton si la celda presenta flujo hortoniano
                                x_actual=q{k,h}(j,1);
                                tol_x = 0.00001;
                                rel_x=[];
                                tol_f = 0.00001 ;
                                for s=1:maxiter;
                                fx=((x_actual-q{k,h}(j-
1,i))/th)+((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5)))*((x_actual-q{k,h}(j,i-
1))/x)-((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(k,h)^(-3/5)))*IT(j,1);
                                dx=(1/th)+((S^(3/10))*(n(k,h)^(-
3/5))/x)*(2*(x_actual^(2/5))-q{k,h}(j,i-1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5))-
IT(j,1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5)));
                                x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
                                rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
                                if abs(fx)<tol_f & abs(rel_x(s))<tol_x;
                                sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                                q{k,h}(j,i)=real(x_nuevo);
                                qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                                if CF(k,h)==-9999
                                Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c)*X;
                                else
                                Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                                end
                                break % si se ha conseguido convergencia,
salimos del bucle
                                end
                                %Actualización
                                x_actual=x_nuevo;
                                end

```

```

        if abs(fx)>tol_f | abs(rel_x(s))>tol_x
            sprintf('No ha habido convergencia en %d
iteraciones',maxiter)
        end
        else %Solución de la onda cinemática con el método de
Newton si la celda presenta flujo canalizado
            x_actual=q{k,h}(j,1);
            tol_x = 0.000001;
            rel_x=[];
            tol_f = 0.000001 ;
            for s=1:maxiter;
                fx=((x_actual-q{k,h}(j-
1,i))/th)+((cof(k,h))*(x_actual^(exp3(k,h)))*(S^(exp1(k,h)))*(n(k,h)^(exp2(k,h))))*((x
_actual-q{k,h}(j,i-1))/x)-
((cof(k,h))*(x_actual^(exp3(k,h)))*(S^(exp1(k,h)))*(n(k,h)^(exp2(k,h))))*IT(j,1)*x;
dx=(1/th)+((1+exp3(k,h))*cof(k,h))*(S^(exp1(k,h))*x_actual^(exp3(k,h))*n(k,h)^(exp2(k,
h))*x^-1)-(cof(k,h)*exp3(k,h))*x_actual^(exp3(k,h)-
1)*S^(exp1(k,h))*n(k,h)^(exp2(k,h))*((q{k,h}(j,i-1)/x)+IT(j,1)*x);
            x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
            rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
            if abs(fx)<tol_f && abs(rel_x(s))<tol_x;
                sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                q{k,h}(j,i)=real(x_nuevo);
                qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                if CF(k,h)==-9999
                    Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c)*X;
                else
                    Qap{k,h}(j)=q{k,h}(j,c);
                end
                break % si se ha conseguido convergencia,
salimos del bucle
            end
            x_actual=x_nuevo;
        end
        if abs(fx)>tol_f || abs(rel_x(s))>tol_x
            sprintf('No ha habido convergencia en %d
iteraciones',maxiter);
        end
    end
end
end
end
end
end
end
for y=1:max(max(POS))
    for p=1:r
        for l=1:co
            if POS(p,l)==y && FJ(p,l)==z && V(p,l)==1 % A partir de las uniones
analizadas en el bucle anterior se sigue el cálculo hidrológico en las celdas
siguientes del recorrido hasta encontrarse con otra unión
                S = P(p,l);
                for j=2:f; %Cálculo del caudal inicial de cada celda a partir del
caudal en el punto de salida de las celdas tributarias
                    if p==1 & l~=1 & l~=co
                        if CF(p,l)==-9999
                            N=[0 0 0 qap{p,l-1}(j) qap{p,l+1}(j) qap{p+1,l-1}(j)
qap{p+1,l}(j) qap{p+1,l+1}(j)];
                        else
                            N=[0 0 0 Qap{p,l-1}(j) Qap{p,l+1}(j) Qap{p+1,l-1}(j)
Qap{p+1,l}(j) Qap{p+1,l+1}(j)];
                        end
                    end
                    if p==r & l~=1 & l~=co
                        if CF(p,l)==-9999

```

```

                                N=[qap{p-1,l-1}(j) qap{p-1,l}(j) qap{p-1,l+1}(j)
qap{p,l-1}(j) qap{p,l+1}(j) 0 0 0];
                                else
                                N=[Qap{p-1,l-1}(j) Qap{p-1,l}(j) Qap{p-1,l+1}(j)
Qap{p,l-1}(j) Qap{p,l+1}(j) 0 0 0];
                                end
                                end
                                if p==1 & l==1
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[0 0 0 0 qap{p,l+1}(j) 0 qap{p+1,l}(j)
qap{p+1,l+1}(j)];
                                else
                                N=[0 0 0 0 Qap{p,l+1}(j) 0 Qap{p+1,l}(j)
Qap{p+1,l+1}(j)];
                                end
                                end
                                if p==1 & l==co
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[0 0 0 qap{p,l-1}(j) 0 qap{p+1,l-1}(j) qap{p+1,l}(j)
0];
                                else
                                N=[0 0 0 Qap{p,l-1}(j) 0 Qap{p+1,l-1}(j) Qap{p+1,l}(j)
0];
                                end
                                end
                                if p==r & l==1
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[0 qap{p-1,l}(j) qap{p-1,l+1}(j) 0 qap{p,l+1}(j) 0 0
0];
                                else
                                N=[0 Qap{p-1,l}(j) Qap{p-1,l+1}(j) 0 Qap{p,l+1}(j) 0 0
0];
                                end
                                end
                                if p==r & l==co
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[qap{p-1,l-1}(j) qap{p-1,l}(j) 0 qap{p,l-1}(j) 0 0 0
0];
                                else
                                N=[Qap{p-1,l-1}(j) Qap{p-1,l}(j) 0 Qap{p,l-1}(j) 0 0 0
0];
                                end
                                end
                                if l==1 & p~=1 & p~=r
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[0 qap{p-1,l}(j) qap{p-1,l+1}(j) 0 qap{p,l+1}(j) 0
qap{p+1,l}(j) qap{p+1,l+1}(j)];
                                else
                                N=[0 Qap{p-1,l}(j) Qap{p-1,l+1}(j) 0 Qap{p,l+1}(j) 0
Qap{p+1,l}(j) Qap{p+1,l+1}(j)];
                                end
                                end
                                if l==co & p~=1 & p~=r
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[qap{p-1,l-1}(j) qap{p-1,l}(j) 0 qap{p-1,l-1}(j) 0
qap{p-1,l-1}(j) qap{p+1,l}(j) 0];
                                else
                                N=[Qap{p-1,l-1}(j) Qap{p-1,l}(j) 0 Qap{p-1,l-1}(j) 0
Qap{p-1,l-1}(j) Qap{p+1,l}(j) 0];
                                end
                                end
                                if p~=1 & p~=r & l~=1 & l~=co
                                if CF(p,l)==-9999
                                N=[qap{p-1,l-1}(j) qap{p-1,l}(j) qap{p-1,l+1}(j)
qap{p,l-1}(j) qap{p,l+1}(j) qap{p+1,l-1}(j) qap{p+1,l}(j) qap{p+1,l+1}(j)];
                                else

```

```

N=[Qap{p-1,l-1}(j) Qap{p-1,l}(j) Qap{p-1,l+1}(j)
Qap{p,l-1}(j) Qap{p,l+1}(j) Qap{p+1,l-1}(j) Qap{p+1,l}(j) Qap{p+1,l+1}(j)];
end
end
q{p,l}(j,1)=sum(J{p,l}.*N);
for i=2:c
    if CF(p,l)==-9999 %Solución de la onda cinemática con el
método de Newton si la celda presenta flujo hortoniano
        x_actual=q{p,l}(j,1);
        tol_x = 0.000001;
        rel_x=[];
        tol_f = 0.000001 ;
        for s=1:maxiter;
            fx=((x_actual-q{p,l}(j-
1,i))/th)+((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(p,l)^(-3/5)))*((x_actual-q{p,l}(j,i-
1))/x)-((5/3)*(x_actual^(2/5))*(S^(3/10))*(n(p,l)^(-3/5))*IT(j,1);
            dx=(1/th)+((S^(3/10))*(n(p,l)^(-
3/5))/x)*(2*(x_actual^(2/5))-q{p,l}(j,i-1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5))-
IT(j,1)*(2/3)*(x_actual^(-3/5)));
            x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
            rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
            if abs(fx)<tol_f & abs(rel_x(s))<tol_x;
                sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                q{p,l}(j,i)=real(x_nuevo);
                qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c);
                if CF(p,l)==-9999
                    Qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c)*X;
                else
                    Qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c);
                end
                break % si se la conseguido convergencia,
salimos del bucle
            end
            x_actual=x_nuevo;
        end
        if abs(fx)>tol_f | abs(rel_x(s))>tol_x
            sprintf ('No la labido convergencia en %d
iteraciones',maxiter);
        end
    else %Solución de la onda cinemática con el método de
Newton si la celda presenta flujo canalizado
        x_actual=q{p,l}(j,1);
        tol_x = 0.000001;
        rel_x=[];
        tol_f = 0.000001 ;
        for s=1:maxiter;
            fx=((x_actual-q{p,l}(j-
1,i))/th)+((cof(p,l))*(x_actual^(exp3(p,l)))*(S^(exp1(p,l)))*(n(p,l)^(exp2(p,l))))*((x
_actual-q{p,l}(j,i-1))/x)-
((cof(p,l))*(x_actual^(exp3(p,l)))*(S^(exp1(p,l)))*(n(p,l)^(exp2(p,l))))*IT(j,1)*x;
            dx=(1/th)+((1+exp3(p,l))*cof(p,l))*(S^(exp1(p,l))*x_actual^(exp3(p,l))*n(p,l)^(exp2(p,
l))*x^-1)-(cof(p,l)*exp3(p,l)*x_actual^(exp3(p,l)-
1)*S^(exp1(p,l))*n(p,l)^(exp2(p,l))*((q{p,l}(j,i-1)/x)+IT(j,1)*x);
            x_nuevo=x_actual-fx/dx ;
            rel_x=[rel_x;(x_actual-x_nuevo)/x_nuevo];
            if abs(fx)<tol_f && abs(rel_x(s))<tol_x;
                sprintf('Convergencia en la iteración: %4i
\nSolución:%10.7f',i-1,x_nuevo);
                q{p,l}(j,i)=real(x_nuevo);
                qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c);
                if CF(p,l)==-9999
                    Qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c)*X;
                else
                    Qap{p,l}(j)=q{p,l}(j,c);
                end
            end
        end
    end
end
end

```

```

                                break % si se ha conseguido convergencia,
salimos del bucle
                                end
                                x_actual=x_nuevo;
                                end
                                if abs(fx)>tol_f || abs(rel_x(s))>tol_x
                                    sprintf ('No ha habido convergencia en %d
iteraciones',maxiter);
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
                                end
for i=1:r
    for j=1:co
        if O(i,j)==-9999
            q{i,j}=0;
        end
    end
end
end

Q=cell(r,co);
for i=2:r
    for j=2:co
        if CF(i,j)==-9999
            Q{i,j}=X*q{i,j};
        else
            Q{i,j}=q{i,j};
        end
    end
end
end

AR=cell(r,co); %Matriz de áreas mojadas
for i=2:r
    for j=2:co
        if CF(i,j)==1
            for k=1:f
                for l=1:c
                    AR{i,j}(k,l)=(Q{i,j}(k,l)*n(i,j)*(b(i,j)^(2/3))/(P(i,j)^(1/2)))^(1/((5/3)-
(2/3)*m(i,j)))));
                end
            end
        end
    end
end
end

ha=cell(r,co); %Matriz de calados
for i=2:r
    for j=2:co
        ha{i,j}=zeros(f,c);
    end
end
end
for i=2:r
    for j=2:co
        if O(i,j)==-9999
            ha{i,j}=0;
        else
            for k=1:f
                for l=1:c
                    if CF(i,j)==-9999

```

```

ha{i,j}(k,l)=(n(i,j)^(3/5))*((q{i,j}(k,l))^(3/5))/(P(i,j)^(3/10));
    end
    if CF(i,j)==1 && ANG(i,j)~=90
        ha{i,j}(k,l)=(-
BASE(i,j)+((BASE(i,j)^2)+4*AR{i,j}(k,l)*(1/tand(ANG(i,j))))^0.5)/(2/(tand(ANG(i,j))));
    end
    if CF(i,j)==1 && ANG(i,j)==90
        ha{i,j}(k,l)=AR{i,j}(k,l)/BASE(i,j);
    end
end
end
end
end
end
end

AEQ=cell(r,co); %Matriz de anchos equivalentes
for i=2:r
    for j=2:co
        if CF(i,j)==1
            for k=2:f
                for l=1:c
                    AEQ{i,j}(k,l)=AR{i,j}(k,l)./ha{i,j}(k,l);
                end
            end
        end
    end
end
end

for i=2:r
    for j=2:co
        if CF(i,j)==1
            q{i,j}=Q{i,j}./AEQ{i,j};
        end
    end
end

tau=cell(r,co); %Matriz de tensiones tangenciales
for i=2:r
    for j=2:co
        for k=1:f
            for l=1:c
                if CF(i,j)==-9999 && O(i,j)~-9999
                    tau{i,j}(k,l)=10000*ha{i,j}(k,l)*P(i,j);
                end
                if CF(i,j)==1
tau{i,j}(k,l)=10000*(AR{i,j}(k,l))*P(i,j)/(b(i,j)*AR{i,j}(k,l)^m(i,j));
                end
            end
        end
    end
end

v=cell(r,co); %Matriz de velocidades
for i=2:r
    for j=2:co
        if O(i,j)==-9999
            v{i,j}=0;
        else
            if V(i,j)==0
                for k=2:f
                    for l=2:c
                        if CF(i,j)==-9999
                            v{i,j}(k,l)=q{i,j}(k,l)/ha{i,j}(k,l);
                        else
                            v{i,j}(k,l)=Q{i,j}(k,l)/(AR{i,j}(k,l));
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

                                end
                            end
                        end
                    else
                        for k=2:f
                            for l=1:c
                                if CF(i,j)==-9999
                                    v{i,j}(k,l)=q{i,j}(k,l)/ha{i,j}(k,l);
                                else
                                    v{i,j}(k,l)=Q{i,j}(k,l)/(AR{i,j}(k,l));
                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

### SUBROUTINA DE CÁLCULO EROSIVO

```

Cdi = input ('Parámetro de calibración impacto: ');
Cdf = input ('Parametro de calibracion flujo: ');
Cdt = input ('Parámetro de calibración transporte: ');
K = input ('Matriz de coeficiente erosionabilidad USLE: ');
C = input ('Matriz de coeficiente de cubierta vegetal USLE: ');

tho=t*60;
Iho=[1:int];
for i=1:int
    Iho(i)=Llu(i)/(tho);
end

ITho=zeros(f,1);
for i=2:int+1
    ITho(i,1)=Iho(i-1);
end

Zm=zeros(f,1); %Vector de parámetros de calado umbral a partir del cual no se produce
desprendimiento por impacto de la lluvia
for i=1:f
    Zm(i,1)=6.69*(ITho(i,1)^0.182);
end

DI=cell(r,co); %Matriz de matrices de valores de desprendimiento por impacto de la
lluvia
for i=2:r
    for j=2:co
        if O(i,j)~-9999
            for k=2:f
                for l=2:c
                    if Zm(k,1)/1000 > ha{i,j}(k,l) && ha{i,j}(k,l)~=0;
                        DI{i,j}(k,l)=(Cdi*K(i,j)*C(i,j)*(ITho(k,1)^2)*(1-
(ha{i,j}(k,l)/Zm(k,1)))*(2.96*(P(i,j)^0.79)+0.56))*(1/3600);
                    else
                        DI{i,j}(k,l)=0;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

DF=cell(r,co); %Matriz de matrices de valores de desprendimiento por flujo
for i=1:r
    for j=1:co
        if O(i,j)~= -9999
            for k=2:f
                for l=2:c
                    DF{i,j}(k,l)=Cdf*C(i,j)*K(i,j)*((tau{i,j}(k,l))^1.5)/3600;
                end
            end
            for k=f-TCONC(i,j):f
                for l=2:c
                    DF{i,j}(k,l)=0;
                end
            end
        end
    end
end

TC=cell(r,co); %Matriz de matrices de valores de la capacidad de transporte
for i=1:r
    for j=1:co
        for k=2:f
            for l=2:c
                if O(i,j)~= -9999
                    if q{i,j}(k,l)<=0.00076
                        TC{i,j}(k,l)=Cdt*C(i,j)*P(i,j)*((q{i,j}(k,l)*60)^0.5);
                    else
                        TC{i,j}(k,l)=101.4*Cdt*C(i,j)*P(i,j)*((q{i,j}(k,l)*60)^2);
                    end
                end
            end
        end
    end
end

qs1=cell(r,co); % caudal sólido calculado con método explícito
qs=cell(r,co); % caudal sólido calculado con método implícito
DEP1=cell(r,co);
DEP=cell(r,co); %Matriz de matrices de deposiciones
for k=2:r-1
    for h=2:co-1
        qs{k,h}=(zeros(f,c));
    end
end
for k=2:r-1
    for h=2:co-1
        qs1{k,h}=(zeros(f,c));
    end
end
qsap=cell(r,co);
for k=1:r
    for h=1:co
        qsap{k,h}=(zeros(f,1));
    end
end
qslap=cell(r,co);
for k=1:r
    for h=1:co
        qslap{k,h}=(zeros(f,1));
    end
end

for z=0; %El cálculo erosivo sigue el mismo esquema que el empleado en el cálculo
hidrológico
    for k=1:r
        for h=1:co
            if F(k,h)==z

```



```

        if V(k,h)==0
            for j=2
                for i=2;

qs{k,h}(j,i)=x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
                    if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
                        qs1{k,h}(j,i)=x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i));
                    else

qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*(tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i)));
                    end
                    if qs1{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                        DEP1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                        qs1{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                    end
                    if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                        DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                        qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                    end
                    end
                    for i=3:c
                        qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+qs{k,h}(j,i-
1))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
                        if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
                            qs1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*(qs1{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1));
                        else

qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*(tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i)));
                        end
                        if qs1{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                            DEP1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                            qs1{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                        end
                        if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                            DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                            qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                        end
                        qsap{k,h}(2,1)=qs{k,h}(2,c);
                        qs1ap{k,h}(2,1)=qs1{k,h}(2,c);
                    end
                end
            end
            for j=3:f
                for i=2;

qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+(x/tho)*(qs{k,h}(j-1,i)/(v{k,h}(j-
1,i))))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
                    if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
                        qs1{k,h}(j,i)=x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i));
                    else
                        qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*((qs1{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-
1,i))+tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(tho/x)*qs1{k,h}(j-1,i));
                    end
                    if qs1{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                        DEP1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                        qs1{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                    end
                    if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                        DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                        qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                    end
                    end
                end
            end
            for i=3:c

```

```

        qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+qs{k,h}(j,i-
1)+(x/tho)*(qs{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-1,i)))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
        if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
            qs1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*((qs1{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1))-(qs1{k,h}(j-
1,i-1)/v{k,h}(j-1,i-1)));
        else
            qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*((qs1{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-
1,i))+tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(tho/x)*(qs1{k,h}(j-1,i)-qs1{k,h}(j-1,i-1)));
        end
        if qs1{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEPl{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qs1{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        qs1ap{k,h}(j,1)=qs1{k,h}(j,c);
        qsap{k,h}(j,1)=qs{k,h}(j,c);
    end
end
end
end
end
end
for y=1:max(max(POSI))
    for k=1:r
        for h=1:co
            if V(k,h)==1 && POSI(k,h)==y
                for j=2;
                    if J{k,h}(1)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k-1,h-1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h-1}(j);
                    end
                    if J{k,h}(2)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k-1,h}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h}(j);
                    end
                    if J{k,h}(3)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k-1,h+1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h+1}(j);
                    end
                    if J{k,h}(4)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k,h-1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k,h-1}(j);
                    end
                    if J{k,h}(5)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k,h+1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k,h+1}(j);
                    end
                    if J{k,h}(6)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k+1,h-1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h-1}(j);
                    end
                    if J{k,h}(7)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k+1,h}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h}(j);
                    end
                    if J{k,h}(8)==1
                        qs1{k,h}(j,1)=qs1ap{k+1,h+1}(j);
                        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h+1}(j);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
for i=2:c;

```

```

        qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+qs{k,h}(j,i-
1))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
        if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
            qs1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*((qs1{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1)));
        else
            qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*(tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i)));
        end
        if qs1{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEP1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qs1{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        qsap{k,h}(2,1)=qs{k,h}(j,c);
        qslap{k,h}(2,1)=qs1{k,h}(j,c);
    end
end
for j=3:f
    if J{k,h}(1)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k-1,h-1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h-1}(j);
    end
    if J{k,h}(2)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k-1,h}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h}(j);
    end
    if J{k,h}(3)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k-1,h+1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k-1,h+1}(j);
    end
    if J{k,h}(4)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k,h-1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k,h-1}(j);
    end
    if J{k,h}(5)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k,h+1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k,h+1}(j);
    end
    if J{k,h}(6)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k+1,h-1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h-1}(j);
    end
    if J{k,h}(7)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k+1,h}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h}(j);
    end
    if J{k,h}(8)==1
        qs1{k,h}(j,1)=qslap{k+1,h+1}(j);
        qs{k,h}(j,1)=qsap{k+1,h+1}(j);
    end
end
for i=2:c;
    qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+qs{k,h}(j,i-
1)+(x/tho)*(qs{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-1,i)))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
    if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
        qs1{k,h}(j,i)=qs1{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*((qs1{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1))-(qs1{k,h}(j-
1,i-1)/v{k,h}(j-1,i-1)));
    else
        qs1{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*((qs1{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-
1,i))+tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(tho/x)*(qs1{k,h}(j-1,i)-qs1{k,h}(j-1,i-1)));
    end
end

```

```

        if qsl{k,h}(j,i) >= TC{k,h}(j,i)/60
            DEP1{k,h}(j,i) = qsl{k,h}(j,i) - TC{k,h}(j,i)/60;
            qsl{k,h}(j,i) = TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        if qs{k,h}(j,i) >= TC{k,h}(j,i)/60
            DEP{k,h}(j,i) = qs{k,h}(j,i) - TC{k,h}(j,i)/60;
            qs{k,h}(j,i) = TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        qslap{k,h}(j,1) = qsl{k,h}(j,c);
        qsap{k,h}(j,1) = qs{k,h}(j,c);
    end
end
end
end
end
end
for z=2:max(max(F));
    for k=1:r
        for h=1:co
            if F(k,h) == z
                if V(k,h) ~ 1
                    for j=2
                        if k==1 && h~1 && h~=co
                            A=[0 0 0 qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) qsap{k+1,h-1}(j)
                                qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[0 0 0 qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) qslap{k+1,h-1}(j)
                                qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                        if k==r && h~1 && h~=co
                            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j)
                                qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) 0 0 0];
                            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j)
                                qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) 0 0 0];
                        end
                        if k==1 && h==1
                            A=[0 0 0 0 qsap{k,h+1}(j) 0 qsap{k+1,h}(j)
                                qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[0 0 0 0 qslap{k,h+1}(j) 0 qslap{k+1,h}(j)
                                qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                        if k==1 && h==co
                            A=[0 0 0 qsap{k,h-1}(j) 0 qsap{k+1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j)
                                qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[0 0 0 qslap{k,h-1}(j) 0 qslap{k+1,h-1}(j)
                                qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                        if k==r && h==1
                            A=[0 qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j) 0 qsap{k,h+1}(j) 0 0
                                qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[0 qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j) 0 qslap{k,h+1}(j) 0 0
                                qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                        if k==r && h==co
                            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) 0 qsap{k,h-1}(j) 0 0 0
                                qsap{k,h+1}(j) qsap{k+1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) 0 qslap{k,h-1}(j) 0 0 0
                                qslap{k,h+1}(j) qslap{k+1,h-1}(j) qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                        if h==co && k~1 && k~=r
                            A=[0 qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j) 0 qsap{k,h+1}(j) 0
                                qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
                            N=[0 qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j) 0 qslap{k,h+1}(j) 0
                                qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
                        end
                    end
                end
            end
        end
    end
end

```

```

        A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) 0 qsap{k-1,h-1}(j) 0
qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j) 0];
        N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) 0 qslap{k-1,h-1}(j) 0
qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k+1,h}(j) 0];
        end
        if k~=1 && k~=r && h~=1 && h~=co
            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j)
qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) qsap{k+1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j)
qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) qslap{k+1,h-1}(j) qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
            end
            qs{k,h}(j,1)=sum(J{k,h}.*A);
            qsl{k,h}(j,1)=sum(J{k,h}.*N);
            for i=2:c;
                qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))+qs{k,h}(j,i-
1))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)));
                if ((P(k,h)^0.5/n(k,h))*(5/3)*ha{k,h}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
                    qsl{k,h}(j,i)=qsl{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*((qsl{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1)));
                else
                    qsl{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*(tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i)));
                end
                if qsl{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                    DEPl{k,h}(j,i)=qsl{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                    qsl{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                end
                if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
                    DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
                    qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
                end
                qsap{k,h}(j,1)=qs{k,h}(j,c);
                qslap{k,h}(j,1)=qsl{k,h}(j,c);
            end
        end
        for j=3:f
            if k==1 && h~=1 && h~=co
                A=[0 0 0 qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) qsap{k+1,h-1}(j)
qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
                N=[0 0 0 qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) qslap{k+1,h-1}(j)
qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
            end
            if k==r && h~=1 && h~=co
                A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j)
qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) 0 0 0];
                N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j)
qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) 0 0 0];
            end
            if k==1 && h==1
                A=[0 0 0 0 qsap{k,h+1}(j) 0 qsap{k+1,h}(j)
qsap{k+1,h+1}(j)];
                N=[0 0 0 0 qslap{k,h+1}(j) 0 qslap{k+1,h}(j)
qslap{k+1,h+1}(j)];
            end
            if k==1 && h==co
                A=[0 0 0 qsap{k,h-1}(j) 0 qsap{k+1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j)
0];
                N=[0 0 0 qslap{k,h-1}(j) 0 qslap{k+1,h-1}(j)
qslap{k+1,h}(j) 0];
            end
            if k==r && h==1
                A=[0 qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j) 0 qsap{k,h+1}(j) 0 0
0];
                N=[0 qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j) 0 qslap{k,h+1}(j) 0
0 0];
            end
        end
    end
end

```

```

        if k==r && h==co
            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) 0 qsap{k,h-1}(j) 0 0 0
0];
            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) 0 qslap{k,h-1}(j) 0 0
0 0];
        end
        if h==1 && k~=1 && k~=r
            A=[0 qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j) 0 qsap{k,h+1}(j) 0
qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
            N=[0 qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j) 0 qslap{k,h+1}(j) 0
qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
        end
        if h==co && k~=1 && k~=r
            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) 0 qsap{k-1,h-1}(j) 0
qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j) 0];
            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) 0 qslap{k-1,h-1}(j) 0
qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k+1,h}(j) 0];
        end
        if k~=1 && k~=r && h~=1 && h~=co
            A=[qsap{k-1,h-1}(j) qsap{k-1,h}(j) qsap{k-1,h+1}(j)
qsap{k,h-1}(j) qsap{k,h+1}(j) qsap{k+1,h-1}(j) qsap{k+1,h}(j) qsap{k+1,h+1}(j)];
            N=[qslap{k-1,h-1}(j) qslap{k-1,h}(j) qslap{k-1,h+1}(j)
qslap{k,h-1}(j) qslap{k,h+1}(j) qslap{k+1,h-1}(j) qslap{k+1,h}(j) qslap{k+1,h+1}(j)];
        end
        qsl{k,h}(j,1)=sum(J{k,h}.*N);
        qs{k,h}(j,1)=sum(J{k,h}.*A);
        for i=2:c;
            qs{k,h}(j,i)=(x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i)))+qs{k,h}(j,i-
1)+(x/tho)*(qs{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-1,i))/(1+(x/tho*v{k,h}(j,i)))-
1))/(x/tho)>1
            qsl{k,h}(j,i)=qsl{k,h}(j,i-
1)+x*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(x/tho)*((qsl{k,h}(j,i-1)/v{k,h}(j,i-1))-(qsl{k,h}(j-
1,i-1)/v{k,h}(j-1,i-1)));
        else
            qsl{k,h}(j,i)=v{k,h}(j,i)*((qsl{k,h}(j-1,i)/v{k,h}(j-
1,i))+tho*(DF{k,h}(j,i)+DI{k,h}(j,i))-(tho/x)*(qsl{k,h}(j-1,i)-qsl{k,h}(j-1,i-1)));
        end
        if qsl{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEP1{k,h}(j,i)=qsl{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qsl{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        if qs{k,h}(j,i)>=TC{k,h}(j,i)/60
            DEP{k,h}(j,i)=qs{k,h}(j,i)-TC{k,h}(j,i)/60;
            qs{k,h}(j,i)=TC{k,h}(j,i)/60;
        end
        qsap{k,h}(j,1)=qs{k,h}(j,c);
        qslap{k,h}(j,1)=qsl{k,h}(j,c);
    end
end
end
end
end
for y=1:max(max(POS))
    for p=1:r
        for l=1:co
            if POS(p,1)==y && FJ(p,1)==z && V(p,1)==1
                for j=2
                    if p==1 && l~=1 && l~=co
                        A=[0 0 0 qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) qsap{p+1,l-1}(j)
qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
                        N=[0 0 0 qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) qslap{p+1,l-1}(j)
qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
                    end
                    if p==r && l~=1 && l~=co

```

```

A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j)
qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) 0 0 0];
N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j)
qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) 0 0 0];
end
if p==1 && l==1
A=[0 0 0 0 qsap{p,l+1}(j) 0 qsap{p+1,l}(j)
qsap{p+1,l+1}(j)];
N=[0 0 0 0 qslap{p,l+1}(j) 0 qslap{p+1,l}(j)
qslap{p+1,l+1}(j)];
end
if p==1 && l==co
A=[0 0 0 qsap{p,l-1}(j) 0 qsap{p+1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j)
0];
N=[0 0 0 qslap{p,l-1}(j) 0 qslap{p+1,l-1}(j)
qslap{p+1,l}(j) 0];
end
if p==r && l==1
A=[0 qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j) 0 qsap{p,l+1}(j) 0 0
0];
N=[0 qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j) 0 qslap{p,l+1}(j) 0
0 0];
end
if p==r && l==co
A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) 0 qsap{p,l-1}(j) 0 0 0
0];
N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) 0 qslap{p,l-1}(j) 0 0
0 0];
end
if l==1 && p~=1 && p~=r
A=[0 qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j) 0 qsap{p,l+1}(j) 0
qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
N=[0 qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j) 0 qslap{p,l+1}(j) 0
qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
end
if l==co && p~=1 && p~=r
A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) 0 qsap{p-1,l-1}(j) 0
qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j) 0];
N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) 0 qslap{p-1,l-1}(j) 0
qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p+1,l}(j) 0];
end
if p~=1 && p~=r && l~=1 && l~=co
A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j)
qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) qsap{p+1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j)
qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) qslap{p+1,l-1}(j) qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
end
qs{p,l}(j,1)=sum(J{p,l}.*A);
qsl{p,l}(j,1)=sum(J{p,l}.*N);
for i=2:c;
qs{p,l}(j,i)=(x*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i))+qs{p,l}(j,i-
1))/(1+(x/tho*v{p,l}(j,i)));
if ((P(p,l)^0.5/n(p,l))*(5/3)*ha{p,l}(j,i)^((5/3)-
1))/(x/tho)>1
qsl{p,l}(j,i)=qsl{p,l}(j,i-
1)+x*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i))-(x/tho)*((qsl{p,l}(j,i-1)/v{p,l}(j,i-1)));
else
qsl{p,l}(j,i)=v{p,l}(j,i)*(tho*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i)));
end
if qsl{p,l}(j,i)>=TC{p,l}(j,i)/60
DEP1{p,l}(j,i)=qsl{p,l}(j,i)-TC{p,l}(j,i)/60;
qsl{p,l}(j,i)=TC{p,l}(j,i)/60;
end
if qs{p,l}(j,i)>=TC{p,l}(j,i)/60
DEP{p,l}(j,i)=qs{p,l}(j,i)-TC{p,l}(j,i)/60;
qs{p,l}(j,i)=TC{p,l}(j,i)/60;
end

```

```

end
qsap{p,l}(j,1)=qs{p,l}(j,c);
qslap{p,l}(j,1)=qsl{p,l}(j,c);
end
for j=3:f
    if p==1 && l~=1 && l~=co
        A=[0 0 0 qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) qsap{p+1,l-1}(j)
qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
        N=[0 0 0 qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) qslap{p+1,l-1}(j)
qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
    end
    if p==r && l~=1 && l~=co
        A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j)
qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) 0 0 0];
        N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j)
qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) 0 0 0];
    end
    if p==1 && l==1
        A=[0 0 0 0 qsap{p,l+1}(j) 0 qsap{p+1,l}(j)
qsap{p+1,l+1}(j)];
        N=[0 0 0 0 qslap{p,l+1}(j) 0 qslap{p+1,l}(j)
qslap{p+1,l+1}(j)];
    end
    if p==1 && l==co
        A=[0 0 0 qsap{p,l-1}(j) 0 qsap{p+1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j)
0];
        N=[0 0 0 qslap{p,l-1}(j) 0 qslap{p+1,l-1}(j)
qslap{p+1,l}(j) 0];
    end
    if p==r && l==1
        A=[0 qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j) 0 qsap{p,l+1}(j) 0 0
0];
        N=[0 qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j) 0 qslap{p,l+1}(j) 0
0 0];
    end
    if p==r && l==co
        A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) 0 qsap{p,l-1}(j) 0 0 0
0];
        N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) 0 qslap{p,l-1}(j) 0 0
0 0];
    end
    if l==1 && p~=1 && p~=r
        A=[0 qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j) 0 qsap{p,l+1}(j) 0
qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
        N=[0 qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j) 0 qslap{p,l+1}(j) 0
qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
    end
    if l==co && p~=1 && p~=r
        A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) 0 qsap{p-1,l-1}(j) 0
qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j) 0];
        N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) 0 qslap{p-1,l-1}(j) 0
qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p+1,l}(j) 0];
    end
    if p~=1 && p~=r && l~=1 && l~=co
        A=[qsap{p-1,l-1}(j) qsap{p-1,l}(j) qsap{p-1,l+1}(j)
qsap{p,l-1}(j) qsap{p,l+1}(j) qsap{p+1,l-1}(j) qsap{p+1,l}(j) qsap{p+1,l+1}(j)];
        N=[qslap{p-1,l-1}(j) qslap{p-1,l}(j) qslap{p-1,l+1}(j)
qslap{p,l-1}(j) qslap{p,l+1}(j) qslap{p+1,l-1}(j) qslap{p+1,l}(j) qslap{p+1,l+1}(j)];
    end
    qs{p,l}(j,1)=sum(J{p,l}.*A);
    qsl{p,l}(j,1)=sum(J{p,l}.*N);
    for i=2:c;
        qs{p,l}(j,i)=(x*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i))+qs{p,l}(j,i-
1)+(x/tho)*(qs{p,l}(j-1,i)/v{p,l}(j-1,i)))/(1+(x/tho*v{p,l}(j,i)));
        if ((P(p,l)^0.5/n(p,l))*(5/3)*ha{p,l}(j,i)^(5/3)-
1))/(x/tho)>1

```



```

                                qsl{p,l}(j,i)=qsl{p,l}(j,i-
1)+x*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i))-(x/tho)*((qsl{p,l}(j,i-1)/v{p,l}(j,i-1))-(qsl{p,l}(j-
1,i-1)/v{p,l}(j-1,i-1)));
                                else
                                    qsl{p,l}(j,i)=v{p,l}(j,i)*((qsl{p,l}(j-1,i)/v{p,l}(j-
1,i))+tho*(DF{p,l}(j,i)+DI{p,l}(j,i))-(tho/x)*(qsl{p,l}(j-1,i)-qsl{p,l}(j-1,i-1)));
                                end
                                if    qsl{p,l}(j,i)>=TC{p,l}(j,i)/60
                                    DEP1{p,l}(j,i)=qsl{p,l}(j,i)-TC{p,l}(j,i)/60;
                                    qsl{p,l}(j,i)=TC{p,l}(j,i)/60;
                                end
                                if    qsl{p,l}(j,i)>=TC{p,l}(j,i)/60
                                    DEP{p,l}(j,i)=qs{p,l}(j,i)-TC{p,l}(j,i)/60;
                                    qs{p,l}(j,i)=TC{p,l}(j,i)/60;
                                end
                                qslap{p,l}(j,l)=qsl{p,l}(j,c);
                                qsap{p,l}(j,l)=qs{p,l}(j,c);
                            end
                        end
                    end
                end
            end
        end
end

for i=1:r
    for j=1:co
        if O(i,j)~= -9999
            for k=f-TCONC(i,j):f
                for l=2:c
                    DEP1{i,j}(k,l)=0;
                end
            end
        end
    end
end

sumal=cell(r,co);
DHO=zeros(r,co);

for i=1:r
    for j=1:co
        if O(i,j)~-=-9999 && CF(i,j)==-9999
            for k=1:f
                for l=1:c
                    sumal{i,j}(k,l)=DF{i,j}(k,l)+DI{i,j}(k,l);
                end
            end
            DHO(i,j)=(sum(sum(sumal{i,j}))) *tho*x*X;
        end
    end
end

erosion_celdas_hortonianas = sum(sum(DHO))

suma2=cell(r,co);
DRI=zeros(r,co);

for i=1:r
    for j=1:co
        if CF(i,j)==1
            for k=1:f
                for l=1:c
                    suma2{i,j}(k,l)=DF{i,j}(k,l)*AEQ{i,j}(k,l);
                end
            end
            DRI(i,j)=(sum(sum(suma2{i,j}))) *x*tho;

```

```
        end
    end
end

erosion_celdas_rios = sum(sum(DRI))
```

#### 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD EN LA CUENCA MONTBAU

• Como en el análisis de la cuenca Masdeu se comprueba el efecto que produce la variación del coeficiente de erosionabilidad. Concretamente se ha desarrollado el cálculo erosivo con los siguientes valores de  $K$ : 0.058; 0.07 y 0.046. El resto de parámetros se han considerado fijos. Para el coeficiente de cubierta vegetal se han tomado los valores mostrados en la Tabla 6; los parámetros de calibración escogidos han sido 1 para las tres expresiones (desprendimiento por flujo, por salpicadura y capacidad de transporte). Se ha considerado una red de regueros como la mostrada en la Imagen 7-B. Los resultados obtenidos han sido los siguientes.

$K$	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
0.058	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
0.07	12118	7075	1.4	500750	98.6	507825	496280	11	-584	-4.8
0.046	12118	4650	1.4	329060	98.6	333710	321980	10	-398	-3.3

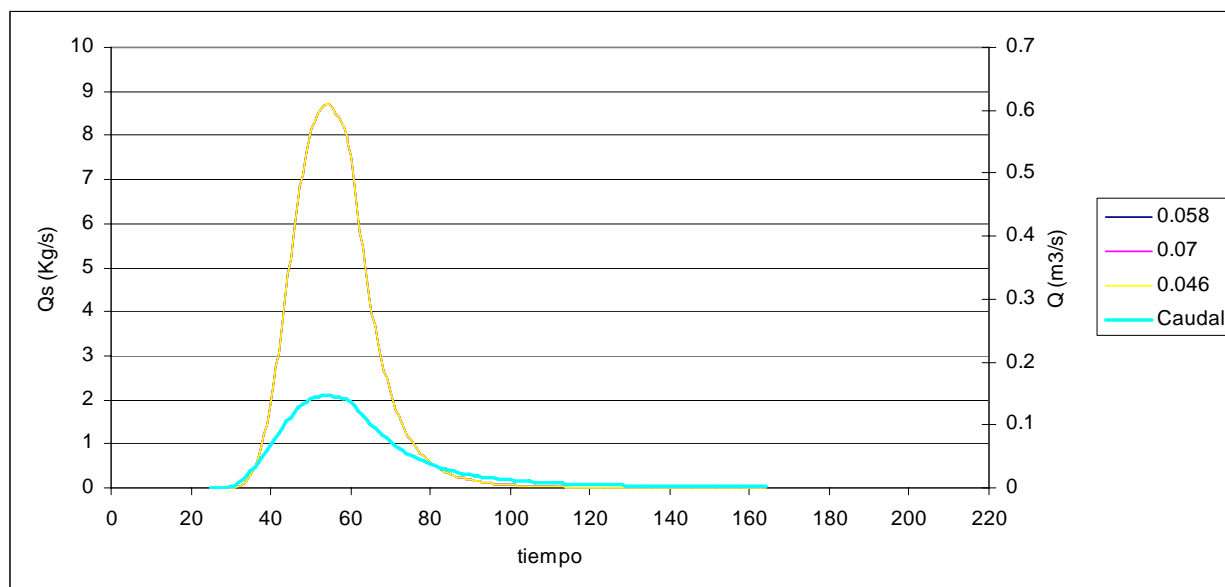
**Tabla 49:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno  $T=2$  años en función del parámetro  $K$ . Cuenca Montbau.

Valor $K$	0.058	0.07	dif %	0.046	dif %
qs punta (kg/s.m)	8.4	8.4	0.0	8.4	0.0
t punta (min)	54	54	-	54	-
Sólido vertido (Kg)	12118	12118	0.0	12118	0.0
Erosión (kg)	420762	507825	20.7	333710	-20.7
Deposición (Kg)	409130	496280	21.3	321980	-21.3

**Tabla 50:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro  $K$  para el periodo de retorno  $T=2$  años. Cuenca Montbau

De las tablas mostradas arriba y observando el Gráfico 89 se puede apreciar que el sedigrama de salida de cuenca es idéntico para las tres erosionabilidades consideradas. La explicación a este hecho es que la cantidad de sólido *entregado* por la cuenca depende básicamente de la capacidad de transporte. Para mayores erosionabilidades se incorpora más cantidad de sedimento en el flujo pero al mismo tiempo; como la capacidad de transporte es idéntica en los tres casos, también se deposita más. Los caudales producidos por la lluvia sintética de dos años de periodo de retorno determinan capacidades de transporte muy pequeñas; que para este rango de valores del coeficiente de erosionabilidad, determinan la cantidad de sedimentos que la cuenca puede verter.

Como consecuencia de la igualdad de condiciones hidráulicas la proporción de sedimentos desprendidos en las celdas hortonianas o canalizadas sea la misma en los tres casos (98.6% de desprendimiento en celdas canalizadas y 1.4% en celdas hortonianas). Incrementos del orden del 20% en el parámetro de erosionabilidad del suelo producen incrementos del mismo orden en el desprendimiento y en la deposición. Cabe destacar en último lugar que la punta de caudal sólido se da en el mismo instante que la punta de caudal líquido. En el siguiente gráfico se puede comprobar que aparte de coincidir los valores máximos, la forma de los diferentes sedigramas es muy similar al hidrograma considerado.



**Gráfico 89:** Sedigramas para cada erosionabilidad analizada e hidrograma en el punto de desagüe para T=2 años.

Para la lluvia de periodo de retorno de diez años se tienen los siguientes resultados:

K	Sedígrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
0.058	102568	19955	2.3	833000	97.7	852955	755630	3	-5246	-5.1
0.07	119172	24083	2.3	1005300	97.7	1029383	915920	3	-5712	-4.8
0.046	85147	15826	2.3	660650	97.7	676476	596050	3	-4724	-5.5

**Tabla 51:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro K. Cuenca Montbau.

Valor K	0.058	0.07	dif %	0.046	dif %
qs punta (kg/s.m)	52.2	61.6	18.1	42.7	-18.1
t punta (min)	49	49	-	49	-
Sólido vertido (Kg)	102568	119172	16.2	85147	-17.0
Erosión (kg)	852955	1029383	20.7	676476	-20.7
Deposición (Kg)	755630	915920	21.2	596050	-21.1

**Tabla 52:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro K para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Montbau.

En este caso el sólido vertido por la cuenca en el punto de desagüe si que depende del coeficiente de erosionabilidad considerado. Como es lógico para mayor erosionabilidad se tiene mayor desprendimiento y mayor deposición. Un incremento del 20% en el valor K produce incrementos del mismo orden en el caudal sólido punta, el sólido vertido por la cuenca, el sólido desprendido y el depositado.

• El siguiente análisis se realiza para comprobar los efectos de la variación del valor de cubierta vegetal  $C$ . Se incrementarán y disminuirán un 20% los valores de la Tabla 6. Como coeficiente de erosionabilidad se ha considerado un valor igual a 0.058. Los parámetros de calibración escogidos han sido 1 para las tres expresiones (desprendimiento por flujo, por salpicadura y capacidad de transporte). Se ha considerado una red de regueros como la mostrada en la Imagen 7. Los resultados obtenidos han sido los siguientes para la lluvia T2.

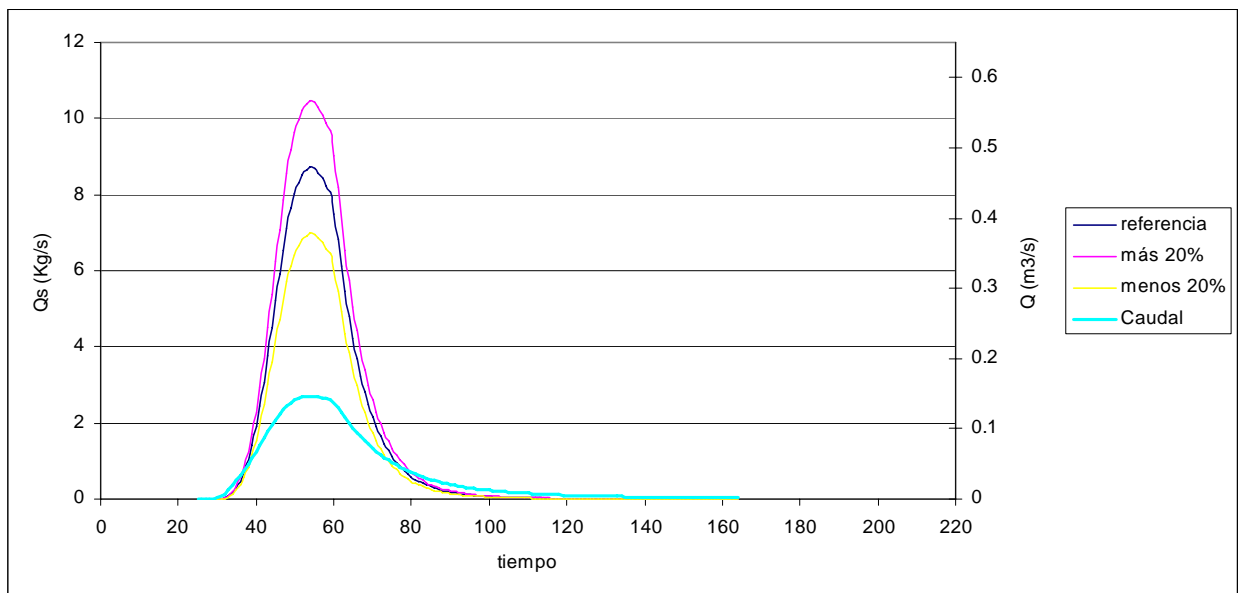
	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
$C$	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
referencia	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
más 20%	14542	7034	1.4	497890	98.6	504924	490960	13	-591	-4.1
menos 20%	9695	4690	1.4	331920	98.6	336610	327300	8.7	-393	-4.1

**Tabla 53:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno  $T=2$  años en función del parámetro  $C$ . Cuenca Montbau.

Valor $C$	ref	más 20%	dif %	menos 20%	dif %
qs punta (kg/s.m)	8.4	10.1	20.0	6.7	-20.0
t punta (min)	54	54	-	54	-
Sólido vertido (Kg)	12118	14542	20.0	9695	-20.0
Erosión (kg)	420762	504924	20.0	336610	-20.0
Deposición (Kg)	409130	490960	20.0	327300	-20.0

**Tabla 54:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro  $C$  para el periodo de retorno  $T=2$  años. Cuenca Montbau.

Como en el análisis análogo de la cuenca Masdeu; todas las variables mostradas en la Tabla 53 aumentan un 20% su valor si se incrementa un 20% el valor del coeficiente de cubierta vegetal. A continuación se muestran los sedigramas del punto de desagüe para los casos analizados:



**Gráfico 90:** Sedigramas para cada valor de cubierta vegetal analizado e hidrograma en el punto de desagüe para  $T=2$  años.

Los resultados del análisis de sensibilidad del factor de cubierta vegetal para la lluvia sintética de diez años de periodo de retorno se muestran a continuación:

	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
C	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
referencia	102568	19955	2.3	833000	97.7	852955	755630	3	-5246	-5.1
más 20%	122612	22790	2.3	951340	97.7	974130	858310	4.5	-6797	-5.5
menos 20%	81742	15193	2.3	634230	97.7	649423	572210	3	-4532	-5.5

**Tabla 55:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=10 años en función del parámetro C. Cuenca Montbau.

Valor C	ref	más 20%	dif %	menos 20%	dif %
qs punta (kg/s.m)	52.2	61.5	17.9	41.0	-21.4
t punta (min)	49	49	-	49	-
Sólido vertido (Kg)	102568	122612	19.5	81742	-20.3
Erosión (kg)	852955	974130	14.2	649423	-23.9
Deposición (Kg)	755630	858310	13.6	572210	-24.3

**Tabla 56:** Variaciones de las variables erosivas en función del valor del parámetro C para el periodo de retorno T=10 años. Cuenca Montbau.

En este caso las variaciones son algo inferiores al 20% cuando se incrementa el valor del parámetro C y del orden del 20% cuando se disminuye.

- A continuación se muestran los resultados del análisis de sensibilidad al considerar tres redes de regueros diferentes (red A regueros poco desarrollados, red B regueros intermedios y red C regueros muy desarrollados).

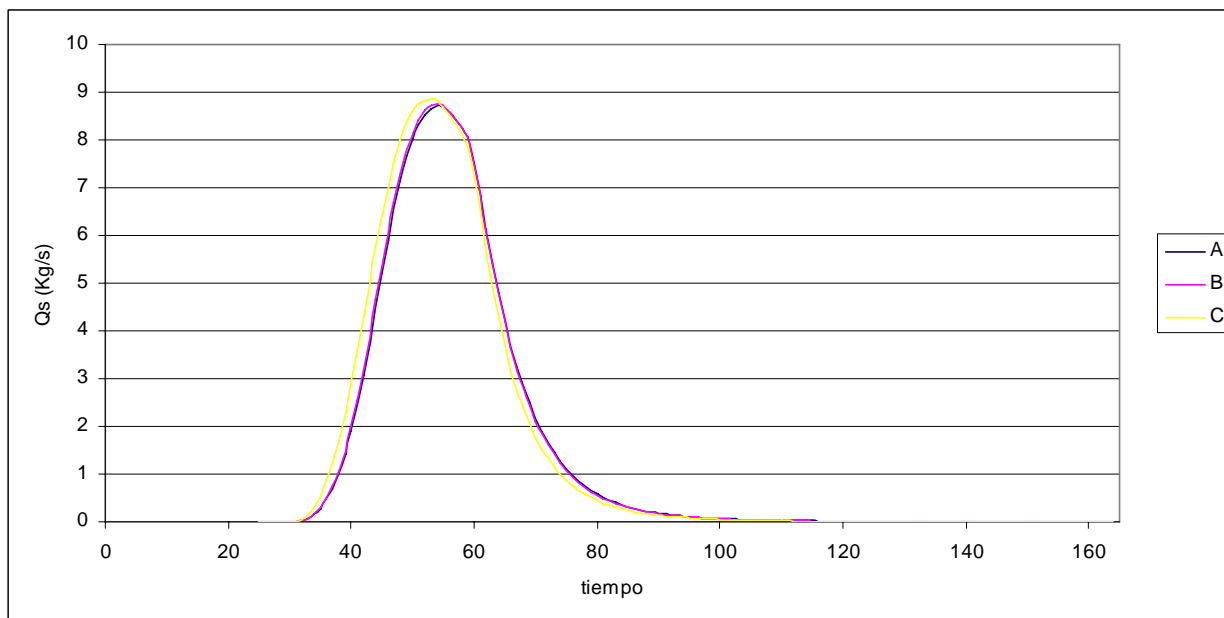
	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
Red	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
A	38655	35341	11.1	282280	88.9	317621	278500	57	409	1.1
B	38934	29414	7.4	368310	92.6	397724	358920	40	-170	-0.4
C	39233	22485	4.3	500080	95.7	522565	483450	27	-145	-0.4

**Tabla 57:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función de la red de regueros. Cuenca Montbau.

Red	A	más 20%	B	menos 20%	C
qs punta (kg/s.m)	8.4	8.5	0.5	8.5	1.4
t punta (min)	54	54	-	53	-
Sólido vertido (Kg)	12118	12187	0.6	12506	3.2
Erosión (kg)	420762	428958	1.9	474501	12.8
Deposición (Kg)	409130	417300	2.0	464180	13.5

**Tabla 58:** Variaciones de las variables erosivas en función de la red de regueros para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau.

Las diferencias en las variables erosivas en función de la red de regueros considerada son aproximadamente 4 veces menores que las obtenidas en el caso análogo de la cuenca Masdeu (ver Tabla 25). Resulta lógico pensar que una cuenca más pequeña sea menos sensible al desarrollo de la red de regueros.



**Gráfico 91:** Sedigramas para cada red de regueros analizada para T=2 años. Cuenca Montbau.

- Como último apartado del análisis de sensibilidad se analiza el efecto que produce la variación del valor de los parámetros de calibración de las expresiones del desprendimiento (por impacto de la lluvia y por flujo) y de la capacidad de transporte. En primer lugar se muestran los resultados de la variación del parámetro del desprendimiento por impacto de lluvia:

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
2	0.1	1	1
3	0.01	1	1
4	100	1	1
5	0.0001	1	1

**Tabla 59:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Montbau.

Caso	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(Kg)	Absoluto	Rel (%)
1	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
2	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
3	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
4	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
5	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1

**Tabla 60:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Cuenca Montbau.

Caso	1	2	dif %	3	dif %	4	dif %	5	dif %
qs punta (kg/s.m)	8.4	8.4	0.0	8.4	0.0	8.4	0.0	8.4	0.0
t punta (min)	54	54	-	54	-	54	-	54	-
Sólido vertido (Kg)	12118	12118	0.0	12118	0.0	12118	0.0	12118	0.0
Erosión (kg)	420762	420762	0.0	420762	0.0	420762	0.0	420762	0.0
Deposición (Kg)	409130	409130	0.0	409130	0.0	409130	0.0	409130	0.0

**Tabla 61:** Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por impacto de lluvia para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau.

Como sucede en la cuenca Masdeu, el cálculo erosivo no depende del valor del parámetro de calibración del desprendimiento por impacto de lluvia. Acto seguido se muestran los resultados que afectan a la variación del valor del coeficiente de calibración del desprendimiento por flujo.

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
6	1	0.1	1
7	1	0.01	1
8	1	0.001	1
9	1	0.0001	1

**Tabla 62:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau.

Caso	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
1	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
6	4962	586.2	1.4	41490	98.6	42076.2	37119	6	-11	-0.2
7	1075	58.62	1.4	4149	98.6	4207.62	3138	4	-9	-0.8
8	296	5.862	1.4	414.9	98.6	420.762	125.4	3	-3	-1.1
9	37	0.5874	1.4	41.49	98.6	42.0774	5.15	1.5	-1	-3.7

**Tabla 63:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau.

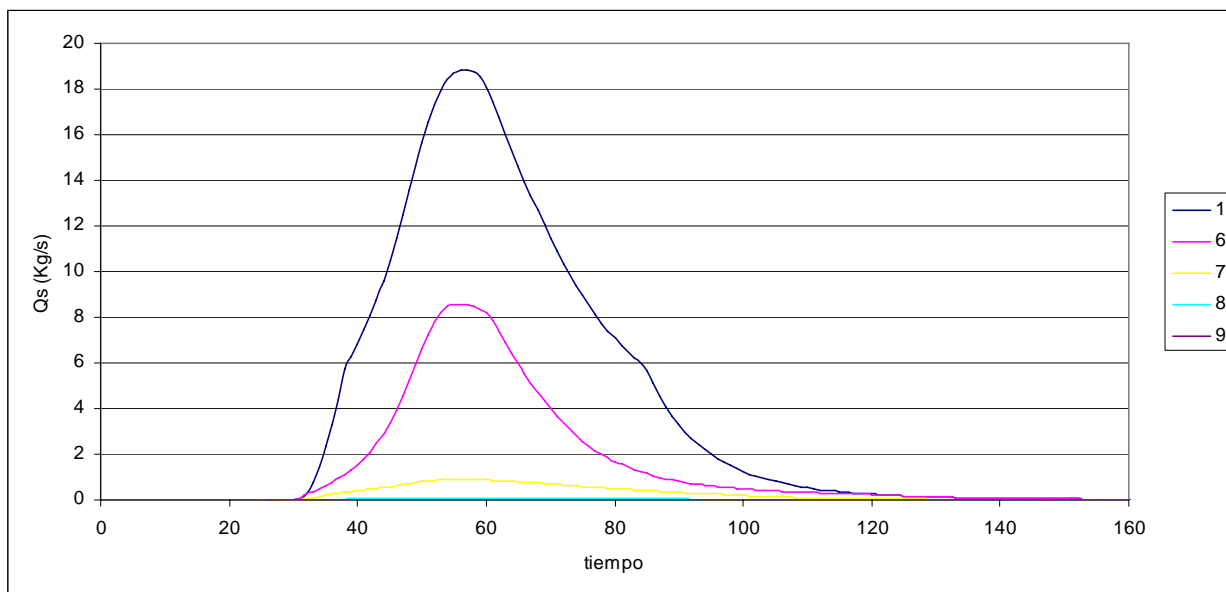
Caso	1	6	dif %	7	dif %	8	dif %	9	dif %
qs punta (kg/s.m)	8.4	2.3	-72.3	0.5	-93.5	0.1	-98.5	0.013	-99.8
t punta (min)	54	54	-	54	-	54	-	54	-
Sólido vertido (Kg)	12118	4962	-59.1	1075	-91.1	296	-97.6	37	-99.7
Erosión (kg)	420762	42076	-90.0	4208	-99.0	421	-99.9	42	-100.0
Deposición (Kg)	409130	37119	-90.9	3138	-99.2	125	-100.0	5	-100.0

**Tabla 64:** Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de desprendimiento por flujo para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau.

Los resultados se comportan siguiendo el patrón de todos los análisis anteriores; a menor valor en el parámetro de calibración, menor desprendimiento, menor deposición, menor caudal sólido punta y menor



sólido vertido por la cuenca. Un descenso de un orden de magnitud en el parámetro de calibración provoca un descenso de un orden de magnitud en la cantidad de sólido desprendido.



**Gráfico 92:** Sedigramas en el punto de desagüe para la lluvia de dos años de periodo de retorno y para cada valor del parámetro de calibración del desprendimiento por flujo. Cuenca Montbau.

El sedigrama del caso nueve no se puede ver en el Gráfico 92 ya que los valores son muy pequeños y la escala del gráfico demasiado amplia. En último lugar se analizan los efectos de variar el valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte.

Caso	impacto	flujo	transporte
1	1	1	1
10	1	1	0.1
11	1	1	10
12	1	1	100
13	1	1	0.01

**Tabla 65:** Valores de los parámetros de calibración utilizados en el análisis de sensibilidad de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau.

Caso	Sedigrama	Erosión					Dep	Alm	Error Balance	
	(kg)	horton (kg)	%	río (kg)	%	Total (Kg)	(Kg)	(kg)	Absoluto	Rel (%)
1	12118	5862	1.4	414900	98.6	420762	409130	10	-496	-4.1
10	1212	5862	1.4	414900	98.6	420762	419960	1	-411	-33.9
11	49617	5862	1.4	414900	98.6	420762	371190	60	-105	-0.2
12	107454	5862	1.4	414900	98.6	420762	313860	361	-913	-0.9
13	121	5862	1.4	414900	98.6	420762	421040	0	-399	-329.4

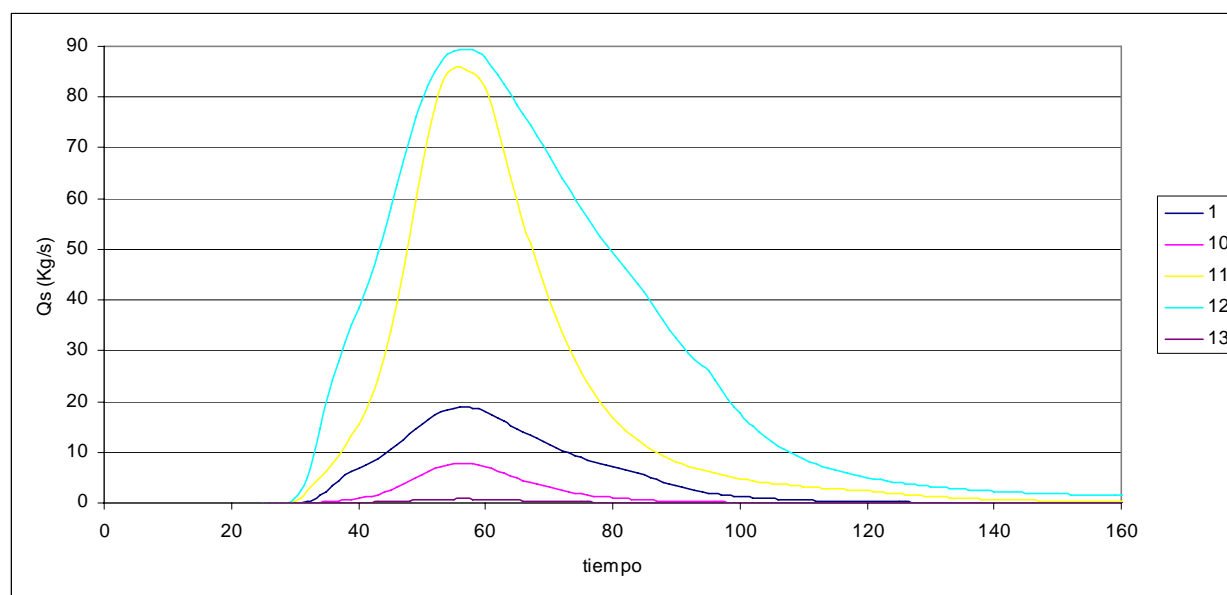
**Tabla 66:** Valores del sólido vertido en el punto de desagüe, de erosión y deposición en toda la cuenca y error en el balance de masa de sedimentos para el periodo de retorno T=2 años en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau.

Caso	1	10	dif %	11	dif %	12	dif %	13	dif %
qs punta (kg/s.m)	8.4	0.8	-90.0	23.3	177.4	54.3	546.3	0.084	-99.0
t punta (min)	54	54	-	54	-	54	-	54	-

Sólido vertido (Kg)	12118	1212	-90.0	49617	309.4	107454	786.7	121	-99.0
Erosión (kg)	420762	420762	0.0	420762	0.0	420762	0.0	420762	0.0
Deposición (Kg)	409130	419960	2.6	371190	-9.3	313860	-23.3	421040	2.9

**Tabla 67:** Variaciones de las variables erosivas en función del parámetro de calibración de la capacidad de transporte para el periodo de retorno T=2 años. Cuenca Montbau.

En los resultados expuestos arriba se contempla que a menor parámetro de calibración, menor capacidad de transporte del flujo y por lo tanto se produce mayor deposición y la cuenca vierte menos sólidos por el punto de desagüe. Cabe destacar los altos valores del error en el balance de masa en los casos 10 y 13. Esto es debido a que al ser la capacidad de transporte tan restringida, se produce mucha deposición (prácticamente la misma que desprendimiento) y el valor de sólido vertido es muy pequeño. Pequeños errores absolutos en el cierre del balance de masas (los errores absolutos del caso 10 y 13 son menores que los del caso 1 y 12) generan pues grandes errores relativos.



**Gráfico 93:** Sedigramas en el punto de desagüe para la lluvia de dos años de periodo de retorno y para cada valor del parámetro de calibración de la capacidad de transporte. Cuenca Montbau.

## 5. RESUMEN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

